



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

고온 초전도 선재를 이용한
토로이드형 초전도 에너지 저장장치의
설계에 관한 연구

**A Study on Design of Toroidal Superconducting Magnetic Energy
Storages using High Temperature Superconducting Wires**

2014년 2월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

이 경 표

**고온 초전도 선재를 이용한
토로이드형 초전도 에너지 저장장치의
설계에 관한 연구**

**A Study on Design of Toroidal Superconducting Magnetic
Energy Storages using High Temperature Superconducting
Wires**

지도교수 정 현 교
이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2013년 12월

서울대학교 대학원
전기 컴퓨터 공학부
이 경 표

이경표의 공학박사 학위논문을 인준함
2013년 12월

위 원 장	_____	(인)
부 위 원 장	_____	(인)
위 원	_____	(인)
위 원	_____	(인)
위 원	_____	(인)

국문초록

초전도 에너지 저장장치 (Superconducting Magnetic energy Storage: SMES)는 에너지 저장시스템 Energy Storage System: ESS)의 하나로, 다른 ESS에 비하여 효율이 매우 높고 속응성이 우수하며 대출력 충방전이 가능하여 전력계통의 전력품질 유지에 적합한 초전도 응용분야로 평가 받고 있다. 특히 고온 초전도 물질의 발견으로 비교적 높은 온도에서 SMES를 운용하게 되고, 에너지 밀도 또한 증가하면서 특히 더 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 고온 초전도 선재는 선재에 가해지는 수직 자장에 의해 특성이 민감하게 바뀌고, 이러한 특성은 SMES의 설계 난이도를 높이고 있다. 토로이드형 SMES는 솔레노이드형 SMES와 달리 외부 누설 자장이 거의 없고, 선재에 가해지는 수직 자장이 작다는 장점이 있어 특히 고온 초전도 선재와 결합되어 많이 연구되고 있다. 하지만 토로이드형 SMES의 코일은 솔레노이드형 SMES의 코일보다 형상이 복잡하여 더 많은 설계변수가 개입되고, 초전도 선재 특성을 같이 고려해 주어야 하기 때문에 설계 방향을 잡기가 힘들다. 또한 구조 관계상 2D 유한요소해석이 불가능하기 때문에 최적화 설계에 소요되는 시간은 기하급수적으로 늘어나게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 모듈형 토로이드형 SMES 코일의 설계기법을 제안하였다. 코일의 설계과정을 단계별로 풀어 쓰고, 각 단계에서 고려해야 할 점을 설명한 뒤 그 과정에서 발생하는 문제의 해결법을 제시한다. 우선 설계변수에 대한 분석을 통해 최적화 설계를 적용할 변수를 선별하고, 이들을 통해 저장 에너지, 중심자장 등을

해석적으로 계산한다. 이 후의 설계 과정에서는 선재에 가해지는 수평, 수직자속밀도를 여러 차례 계산하여야 하는데, 이는 해석적으로 풀어내기 어려워 데이터 테이블을 구축하여 문제를 해결하였다. 데이터 테이블의 크기를 최대한 줄이면서 다양한 규모의 모듈형 토로이드형 SMES에 적용 가능하게 하기 위해서 많은 모델에 대해 해석 및 결과분석을 하였으며, 이를 토대로 몇 가지 매개변수를 선정하여 효율적인 데이터 테이블을 만들 수 있었다. 이러한 데이터 테이블의 도입으로 모듈형 토로이드형 SMES 코일 설계의 전 과정을 유한요소해석 없이 진행할 수 있게 되었다.

제안된 설계기법의 유용성을 확인하기 위해 최적화기법과의 결합을 통해 각기 다른 에너지나 선재종류를 가지는 모듈형 토로이드형 SMES 3가지를 최적 설계하였고, 이를 유한요소해석을 통해 구한 최적설계안과 비교하였다. 제안된 설계기법을 이용한 최적 설계는 유한요소해석을 통해 도출된 최적설계안과 거의 같은 결과를 보이면서 최적 설계 시간을 획기적으로 줄일 수 있었다.

주요어: 토로이드형 초전도 에너지 저장장치 (Toroidal Superconducting Magnetic energy Storage, Toroidal SMES), 고온 초전도 선재 (High Temperature Superconductor, HTS), 설계 기법 design method), 최적설계 Optimal Design)

학번 : 2007-21035

목차

국문 초록.....	i
목차.....	iii
그림 목차.....	vi
표 목차.....	ix
기호 및 약어 설명	x
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 논문 구성	5
제 2 장 SMES의 특징 및 설계 시 고려사항.....	7
2.1 SMES의 원리 및 특징.....	7
2.2 SMES의 구성요소	16
2.3 토로이드형 SMES와 솔레노이드형 SMES의 비교.....	19
제 3 장 토로이드형 SMES 코일 설계기법	22
3.1 SMES의 원리 및 특징.....	22
3.1.1 초전도 상태 유지를 위한 임계 조건.....	22
3.1.2 기계적 특성.....	25
3.1.3 BSCCO와 YBCO 선재	28
3.2 냉각시스템	30
3.3 코일 설계 변수 설정	32

3.4 에너지 계산.....	35
3.5 중심자장 계산	37
3.6 턴 수 및 전류크기 결정	43
3.7 최대 수평, 수직 자속밀도 데이터 테이블 구축	46
3.7.1 최대 자장 데이터 수집 위치	47
3.7.2 전류에 따른 자장 변화	56
3.7.3 최대 수평, 수직자장에 영향을 미치는 변수	59
3.7.4 데이터 테이블의 구성	66
3.8 응력 계산	68
제 4 장 토로이드형 SMES 최적설계	69
4.1 설계변수, 목적함수 및 제한조건	69
4.2 최적 설계 순서도	71
4.2.1 제안된 설계기법을 이용한 최적 설계 순서도	71
4.2.2 유한요소해석을 이용한 최적 설계 순서도	75
4.3 최적 설계 결과.....	79
4.3.1 BSCCO 선재를 이용한 500kJ 토로이드형 SMES 최적설계 ..	80
4.3.2 YBCO CC 선재 이용한 500kJ 토로이드형 SMES 최적설계 ..	84
4.3.3 4MJ 토로이드형 SMES 최적설계	88
4.3.4 온도에 따른 선재량 최적화 결과	91
제 5 장 결론	93
5.1 결론 및 토의	93

5.2 향후 계획	95
참고문헌	96
부록A 초전도 선재의 응력해석	111
부록B 진화전력 알고리즘	115
부록C 2GJ급 토로이드형 SMES 최적설계	124
Abstract.....	127

그림 목차

그림 2.1 SMES의 동작원리	8
그림 2.2 ESS들의 출력과 방전지속시간 비교.....	14
그림 2.3 SMES의 구성 요소.....	16
그림 2.4 여러 가지 타입의 SMES 코일.....	17
그림 2.5 솔레노이드형 SMES의 자속밀도 분포	20
그림 2.6 토로이드형 SEMS의 자속밀도 분포	20
그림 3.1 초전도 선재의 임계곡면	23
그림 3.2 초전도 선재에 가해지는 수평자장과 수직자장	24
그림 3.3 수평, 수직 자속밀도에 따른 고온 초전도 선재의 임계전류 ...	25
그림 3.4 초전도 코일의 로렌츠 힘과 후프 응력	26
그림 3.5 YBCO Coated Conductor의 구조	29
그림 3.6 토로이드형 SMES 코일의 형상 변수	33
그림.3.7 토로이드형 SMES 모델 주기모델	38
그림 3.8 다른 팬케이크 수를 가지는 토로이드형 SMES 모델	39
그림 3.9 다른 모듈 수에 대한 따른 B_0 분포 변화	40
그림 3.10 N 과 I 를 결정하기 위한 순서도	44
그림 3.11 토로이드 전체에서의 자속밀도 분포	47
그림 3.12 모듈 중심 단면의 자속밀도 분포	48

그림 3.13 선재에 가해지는 수평, 수직 자속밀도 해석대상 모듈의 위치	49
그림 3.14 모듈 중앙 단면에서 선재가 받는 수평 자속밀도 분포	50
그림 3.15 모듈 중앙 단면에서 선재가 받는 수직 자속밀도 분포	50
그림 3.16 토로이드 중심에서 모듈 끝단까지의 수평 자속밀도 분포 ...	51
그림 3.17 모듈 각 단면에서의 수평자장 분포	52
그림 3.18 각 단면에서의 수직자장 분포	54
그림 3.19 토로이드 중심에서 모듈 끝단까지의 수직 자속밀도 분포 ...	55
그림 3.20 최대 수평, 수직 자장 데이터 수집 위치	56
그림 3.21 전류크기에 따른 중심자장	57
그림 3.22 전류크기에 따른 수평자장	57
그림 3.23 전류크기에 따른 수직자장	58
그림 3.24 α 와 β 가 고정되었을 때, N_p 와 r 에 따른 자장 해석 결과 .	60
그림 3.25 수평, 수직 자장에 (a) α 나 (b) β 가 미치는 영향	62
그림 3.26 모듈 안쪽과 바깥쪽의 자속밀도 벡터	63
그림 3.27 수직자장의 크기에 영향을 주는 형상 요소	64
그림 3.28 ν 와 ω 가 일정할 때의 r 에 따른 자속밀도	65
그림 4.1 제안된 설계기법을 이용한 최적 설계 순서도	72
그림 4.2 유한요소해석을 이용한 최적 설계 순서도	75
그림 4.3 DI-BSCCO의 수평 자장에 따른 임계전류	81
그림 4.4 DI-BSCCO의 수직 자장에 따른 임계전류	81

그림 4.5 BSCCO 를 사용한 500kJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계안 형상	82
그림 4.6 YBCO CC 선재의 임계전류 특성	85
그림 4.7 YBCO CC 선재를 사용한 500kJ 급 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계안 형상	86
그림 4.8 4MJ 급 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계안 형상	89
그림 4.9 동작온도에 따른 최소 선재량	92
그림 A.1 코일에서의 힘 평형	111
그림 B.1 간단한 목적함수의 예	115
그림 B.2 Univariant method를 이용한 최적점 탐색	116
그림 B.3 여러 개의 국소 최적점을 갖는 목적함수	116
그림 B.4 테스트 함수 1	120
그림 B.5 테스트 함수 1 최적화 결과	121
그림 B.6 테스트 함수 1 최적화 과정	121
그림 B.7 테스트 함수 2	122
그림 B.8 테스트 함수 2 최적화 결과	123
그림 C.1 YBCO 선재의 온도별 J_c -B 특성	125

표 목차

표 2.1 ESS 들의 효율 비교	12
표 2.2 ESS 들의 응답속도 비교	13
표 3.1 적층 물질에 따른 고온 초전도 선재의 기계적 특성	27
표 3.2. 토로이드형 SMES 코일 설계변수	34
표 3.3 데이터 테이블의 입출력 변수	67
표 4.1 DI-BSCCO Type H 기본 특성 (스미토모 제공)	80
표 4.2 BSCCO 선재를 이용한 500kJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계 결과	83
표 4.3 YBCO CC 선재의 기계적 특성 (AMSC 제공)	85
표 4.4 YBCO CC 선재를 이용한 500kJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계 결과	87
표 4.5 4MJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계 결과	90
표 C.1 YBCO 선재를 이용한 2GJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계 결과	90

기호설명

τ	: 초전도 코일 폐회로의 시정수
L	: 초전도 코일의 인덕턴스 [H]
R	: 초전도 코일의 저항 [Ω]
V	: 초전도 코일 터미널 양단에 인가된 전압 [V]
I	: 초전도 코일에 흐르는 전류 [A]
N_p	: 모듈형 토로이드형 SMES의 모듈 수
N	: 모듈 당 선재 턴수
w_{wire}	: 초전도 선재의 폭 [mm]
h_{wire}	: 초전도 선재의 두께 [mm]
r	: 토로이드 중심에서 모듈 중심까지의 거리 [mm]
a	: 모듈의 내반경 [mm]
b	: 모듈의 외반경 [mm]
h	: 모듈의 폭 [mm]
d	: 모듈 사이의 최소간격 [mm]
B_0	: 모듈 중심 자속밀도 [T]
B_t	: 선재에 가해지는 수평 자속밀도
B_n	: 선재에 가해지는 수직 자속밀도
$B_{t,max}$: 선재에 가해지는 최대 수평 자속밀도
$B_{n,max}$: 선재에 가해지는 최대 수직 자속밀도
μ_0	: 공기의 투자율 [H/m]
I_c	: 초전도 선재의 임계전류 [A]
LF	: Load factor
LF_{min}	: 설계 상 허용가능한 최소 load factor
LF_{max}	: 설계 상 허용가능한 최대 load factor
B_x, B_y, B_z	: 자속밀도의 x, y, z 성분 [T]
α	: a/r
β	: b/r

p_{in} : 이웃 모듈 내벽 간의 거리 [mm]
 p_{out} : 이웃 모듈 외벽 간의 거리 [mm]
 q : 모듈 표면에 수직자장이 최대가 되는 점을 지나는 자속 경로의 길이 [mm]
 ν : p_{in}/q
 ω : p_{out}/q

제1장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

전력 시스템의 발달로 인하여 에너지저장시스템 (Energy Storage System, ESS)에 대한 수요가 계속해서 늘어나고 있는데, 그 이유는 다음과 같다. 첫 번째로 ESS는 경부하 시에 유희전력을 저장하고, 이를 최대부하 시에 사용하는 부하평준화 (load leveling)를 통해 전력운영 최적화에 기여한다. 두 번째로는 분산전원 도입과 마이크로 그리드 운영 등에서 특히 문제가 되는 급격한 부하변동, 러시 전류 (rush current), 순저 등 단기변동의 평준화에 사용된다. 세 번째로 주파수, 전압 조정 등을 통해 전력품질 개선에 기여할 수 있다. 전력생산량이 시간에 따라 불규칙하게 변하는 태양광 및 풍력 발전 등의 분산전원 증가와 반도체 기기와 같은 전력품질에 민감한 부하의 증가로 인해 ESS의 두 번째와 세 번째 역할은 특히 중요해지고 있는데, 이에 대응하기 위해서는 속응성이 우수하며 대용량 충방전이 가능한 ESS가 필요하다 [1] - [8].

초전도 에너지 저장장치 (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)는 이러한 요구조건에 잘 부합하는 ESS로, ms 단위의 응답속도를 가지면서 수 MW의 전력을 충방전할 수 있다. SMES는 초전도 코일에 전류를 인가함으로써 전기 에너지를 자기 에너지 형태로 저장하는데, 초전도 코일은 초전도 특성이 깨지지 않는 한 저항이 0인 상태를 유지하기 때문에 손실이 일어나지 않는다. 따라서 전력변환장치에서의 손실과 교류

손실 등을 감안하더라도 95% 정도의 높은 사이클 효율을 보인다. 또한 현재 에너지 저장량에 상관없이 자유롭게 충방전이 가능하고, 충방전에 따른 노후화가 거의 없기 때문에 빈번한 충방전에 유리하며, 시스템 수명이 길다 [9]–[13].

지난 30년간 SMES 기술은 초전도 응용 분야에서 가장 활발한 연구가 진행된 분야 중 하나이다 [13]–[52]. SMES에 사용되는 코일의 형상 중 대표적인 것으로 솔레노이드형과 토로이드형이 있는데, 토로이드형은 외부 누설 자장이 거의 없고, 선재에 가해지는 수직자장이 작다는 장점이 있어 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 1986년 고온 초전도 물질이 발견된 후에는 이러한 경향이 더욱 강해지고 있는데, 이는 고온 초전도 선재가 수직 자장에 의해 특성이 민감하게 바뀌기 때문이다 [15]–[19].

고온 초전도체는 100K까지도 초전도성을 잃지 않는 물질로 저온 초전도체를 사용할 때에 비해 냉각 시스템의 부담을 줄일 수 있었지만 위에서 언급된 수직 자장에 대한 취약성과 응력에 약한 기계적 특성으로 인해 코일의 설계는 오히려 복잡해졌다. 이러한 문제를 인식하여 고온 초전도 선재를 이용한 토로이드형 SMES 코일 설계에 관한 연구결과가 계속해서 도출되고 있다 [37]–[52]. 토로이드형 SMES 코일 설계 과정에 필요한 에너지, 자속밀도, 손실, 응력을 계산하기 위한 연구가 계속되었으며 [37]–[44], 다양한 에너지 용량에 대해 개념적 설계가 이루어지고 있다 [45], [48]. 현재까지 실제 설계하여 제작 및 실험을 진행하는 것은 MJ 단위의 토로이드형 SMES이지만, GJ 단위의 대용량 모델에 대한 검토도

이루어지고 있다 [50], [88]. 이들 연구는 토로이드형 SMES 코일의 설계기법보다는 설계자의 경험과 시행착오를 통해 얻어진 설계안을 해석하고 평가하는데 주안점을 두고 있다. F. Stefanescu는 해석적인 방법을 통해 에너지 밀도를 최대화하는 토로이드형 SMES 코일 설계기법을 제안하였지만, 선재에 가해지는 자속밀도에 대해서는 고려하지 않았다 [51]. C.H. Im은 비오사바르 법칙을 통해 수직 및 수평 자속밀도를 고려하는 설계기법을 제안하여 최적설계 시간을 줄였지만, 확률론적 최적화 기법을 적용하기에는 여전히 많은 시간을 소요하였다 [52].

토로이드형 SMES 코일 설계에 확률론적인 최적화 기법을 적용하지 못하는 것은 그 형상적 특성에서 기인한다. 토로이드형 SMES의 코일은 솔레노이드형 SMES의 코일보다 형상이 복잡하여 더 많은 설계변수를 가지고, 구조상 2D 유한요소해석이 불가능하다. 이 때문에 최적설계 기법을 사용할 경우 지나치게 긴 시간이 걸리게 되며, 최적설계안의 신뢰도 확보를 위하여 확률론적인 최적설계 기법을 선택할 경우 이러한 문제는 더욱 심각해진다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 고온 초전도 선재를 이용한 토로이드형 SMES 코일의 설계 기법에 관하여 연구하였다. 해석적인 방법과 데이터 테이블을 이용하여 빠른 시간 내에 많은 모델을 검토할 수 있는 코일 설계기법을 제시하고, 이를 포함한 토로이드형 SMES 설계과정을 설명하였다. 제시된 설계기법은 다양한 스케일의 토로이드형 SMES의 설계에 적용 가능하며, 최적화 기법과의 결합이 용이하다는 특징을 가

지고 있다.

제안된 설계기법을 확률론적 최적화 기법인 진화전략 알고리즘과 결합하여 최적설계를 진행하였다. 최적설계 대상은 다른 저장에너지량을 가지거나 다른 초전도 선재를 사용하는 3개의 토로이드형 SMES이며, 3D 유한요소해석을 이용한 최적 설계도 같이 진행하여 비교대상을 확보하였다. 고온 초전도 선재는 대량생산 기술이 아직 연구단계에 있어서 단가가 높기 때문에 최적설계의 목표는 선재사용량의 최소화로 하였다. 각 방법을 이용한 최적설계안들을 비교를 함으로써 제안된 설계기법이 정확한 최적설계안을 찾아냄과 동시에 소요되는 시간을 획기적으로 줄인다는 것을 보여주었다.

1.2 논문 구성

본 논문에서 앞으로의 구성은 다음과 같다.

2장에서는 설계에 앞서 숙지해야 할 SMES의 동작원리에 대해 설명하였고, 다른 에너지 저장장치와의 비교를 통해 SMES의 특징을 살펴보았다. 또한 SMES의 구성요소에 대해 설명하고 솔레노이드형 SMES와의 비교를 통해 토로이드형 SMES의 특징을 설명하였다.

3장에서는 제안된 토로이드형 SMES 설계기법에 대한 설명을 한다. 우선 고온 초전도 선재에 대한 설명과 선재 선택에 있어서 고려해야 할 점 등에 대해 서술하고 SMES에 적용 가능한 냉각시스템의 종류와 각 냉각시스템의 특징을 살펴보았다. 그 후 코일 설계에 필요한 설계변수에 대해 설명하였으며, 요구 저장에너지 계산으로부터 시작하여 중심자장 계산, 전류크기 결정 등 설계기법의 흐름에 따라 순서대로 설명하였다.

4장에서는 제안된 설계기법과 최적설계기법을 결합한 최적 설계 순서도를 제시하고, 비교 대상으로써 유한요소해석을 이용한 최적 설계 순서도도 같이 제시한다. 두 순서도를 통해 각각 3가지 토로이드형 SMES 코일을 설계하여 결과를 비교한다. 두 방법을 이용한 최적 설계안의 근접성, 최적설계 소요시간 등을 검토하여 제안된 설계기법의 유용성을 검증한다.

마지막으로 5장에서는 논문의 요약과 더불어, 결론을 통해 제시된 설계 기법의 의의를 확인하고, 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

제 2 장 SMES의 특징 및 설계 시 고려사항

2.1 SMES의 원리 및 특징

SMES의 기본적인 동작원리는 그림 2.1과 같다. 충전 시에는 전력변환 장치를 통하여 초전도 선재에 흐르는 DC 전류를 증가시킨다. 저장 시에는 전력변환장치와 연결되는 회로를 끊고, 초전도 코일로만 구성된 폐회로를 구성한다. 이 상태에서 전기에너지는 자기에너지 형태로 저장되게 되고, 폐회로에서의 시정수 τ 는

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.1)$$

이 된다. 여기서 L 은 초전도 코일의 인덕턴스, R 은 초전도 코일의 저항인데, L 은 일정한 값을 가지고 초전도 현상에 의해 R 은 0이 되므로, τ 는 무한이 된다. 즉, SMES는 충전이 된 상태에서 전류 감소 없이 무한의 시간 동안 에너지를 저장할 수 있다는 것을 말한다. 방전 시에는 충전 시와 마찬가지로 전력변환장치와 초전도 코일 사이의 회로를 닫은 후, 코일의 전류를 감소시킴으로써 전력계통으로 전기에너지를 내보낸다.

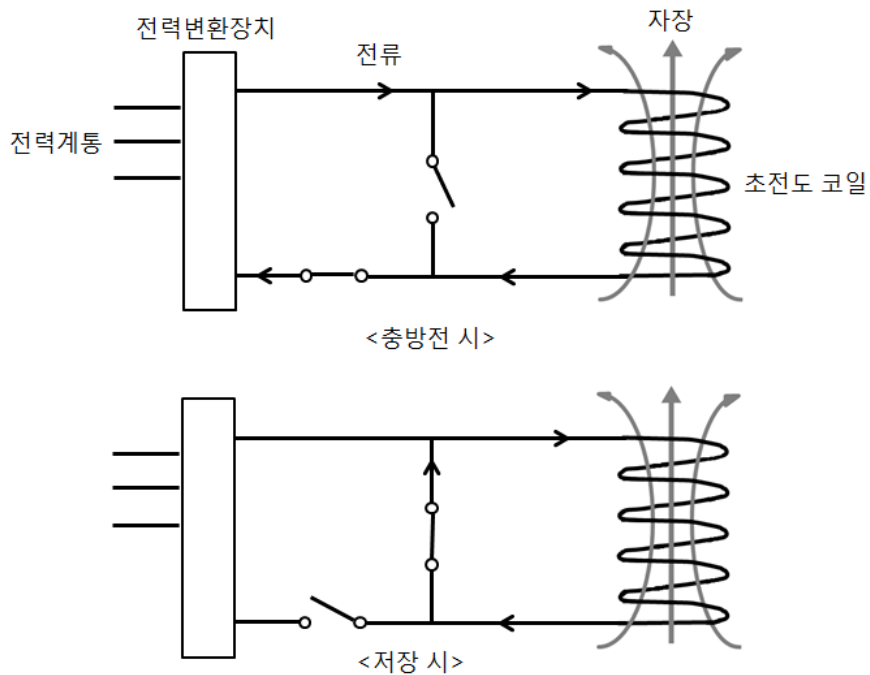


그림 2.1 SMES의 동작원리

Fig. 2.1 Working principle of SMES

SMES가 ESS로서 가지고 있는 특징을 살펴보기 위해 현재 상용화되거나 연구되고 있는 몇 가지 ESS 기술을 먼저 살펴보면 다음과 같다 [60].

– 양수발전 에너지 저장 (Pumped-Hydroelectric Energy Storage, PHES)

PHES는 전기펌프를 이용해 낮은 곳에 있는 물을 높은 곳으로 펴 올려 전기에너지를 위치에너지 형태로 변환해 저장하고, 방전 시에는 수력발전을 통해 전기에너지를 생산한다. 현존하는 에너지 저장장치 중에서 가장

큰 에너지 저장량을 보이지만, 건설 가능한 지리적인 조건이 까다롭고, 초기 건설비용이 크다. 지리적 제한 조건을 극복하기 위해 지하에 저수공간을 만드는 Underground Pumped-Hydroelectric Energy Storage (UPHES)도 있지만 아직 기술적으로 미성숙하다 [61]–[62].

– 압축공기 에너지 저장 (Compressed Air Energy Storage, CAES)

CAES는 전동 공기압축기를 이용해 지하의 저장소에 공기를 압축한 상태로 저장하다가 전기에너지가 필요할 시에는 압축된 공기를 방출하여 가스 터빈을 통해 발전기를 가동시킨다. CAES는 큰 에너지 저장량을 확보하려면 충분한 크기의 저장소를 만들어야 하기 때문에 지리적 제한이 따르며 비용이 많이 든다. 또한 발전 시에 압축공기에 일정 비율의 가스를 혼합해 주어야 하기 때문에 완전한 친환경 ESS 기술이라고 할 수 없다 [63].

– 전지 에너지 저장 (Battery Energy Storage, BES)

BES는 2차 전지를 이용하여 전기에너지의 충, 방전을 하는 에너지 저장 기술이다. 주로 쓰이는 전지는 Lead-Acid (LA) 전지, Nickel-Cadmium (NiCd) 전지, Lithium-Ion (Li-Ion) 전지, Sodium-Sulphur (NaS) 전지 등이 있다. 각 전지마다 특징이 조금씩 다르지만 공통적으로 높은 에너지밀도를 가지는 반면, 화학반응을 이용한 에너지변환 과정을 거치기 때문에 모든 에너지를 단시간에 방출하기 어렵다. BES 기술은 보

통 시간 단위의 방전 시간을 갖는 것이 대부분이다.

– 흐름전지 에너지 저장 (Flow Battery Energy Storage, FBES)

FBES는 흐름전지를 이용한 에너지 저장장치이다. 흐름전지는 전해질의 산화 및 환원 반응에 의해 충방전이 일어나는 2차 전지인데, 일반적인 전지와 다른 점은 에너지가 저장되는 전해질을 순환시키면서 충방전이 이루어진다는 것이다. 충방전은 스택에서 이루어지고, 전기는 별도의 탱크에 보관되는 전해질에 저장된다. 주로 제안되고 있는 흐름 전지는 Vanadium Redox (VR) 흐름 전지, Polysulphide Bromide (PSB) 흐름 전지, Zinc Bromine (ZnBr) 흐름 전지가 있다. 이들은 일반적인 전지에 비해 저비용으로 대용량화할 수 있고, 수명이 길다는 장점이 있지만, 에너지밀도와 효율이 낮다는 단점이 있다. 또한 일반 전지와 마찬가지로 시간 단위의 방전 시간을 갖는다 [64]–[65].

– 플라이휠 에너지 저장 (Flywheel Energy Storage, FES)

FES는 전동기로 회전자 (플라이휠)를 가속시킨 후 회전하는 상태를 유지함으로써 전기에너지를 기계에너지로 변환하여 저장한다. 방전 시에는 전동기가 발전기의 역할을 하면서 기계에너지를 다시 전기에너지로 변환시킨다. FES는 매우 빠른 반응속도를 가지고 있지만, 큰 출력을 구현하기 위해서는 대형 플라이휠이 필요하며, 이에도 한계가 있어 큰 용량의 에너지 저장장치 구현에는 적합하지 않다 [66].

– 슈퍼커패시터 에너지 저장 (Supercapacitor Energy Storage, SCES)

SCES는 일반 커패시터에 비해 월등히 큰 용량을 가지는 슈퍼커패시터를 이용하여 충방전을 수행하는 에너지 저장장치이다. SCES는 높은 출력 밀도와 빠른 응답속도를 가지고 있지만, 에너지 밀도가 낮아 높은 저장에너지를 갖는 시스템을 만들기 위해서는 많은 비용이 들어간다 [67].

이러한 ESS들과 비교하여 SMES가 가지는 장점들은 다음과 같다 [68] – [69].

- 높은 사이클 효율: 표 2.1은 다른 ESS들과 SMES의 효율을 비교한 것이다 [60]. 초전도 현상으로 초전도 코일에는 저항이 존재하지 않기 때문에 충방전 시에도 95% 이상의 높은 사이클 효율을 보인다. 또한 전지와 같은 화학 에너지 저장장치와는 달리 충방전을 반복하여도 성능이 떨어지지 않기 때문에 빈번한 충방전 사이클에 유리하다.

표 2.1 ESS들의 효율 비교

Table 2.1 Comparison of efficiencies of different ESSs

ESS 종류	효율(%)
PHES	70~85
CAES	57~64
Lead-Acid 전지	85
NaS 전지	75~86
ZnBr 흐름전지	75
VR 흐름전지	70~85
PSB 흐름전지	60~75
FES	90~93
SCES	95
SMES	95

- 빠른 응답속도: SMES는 전기-자기 에너지 변환 과정만을 이용해 에너지를 저장, 방출하기 때문에 전기-화학 또는 전기-기계 에너지 변환 과정을 이용하는 다른 ESS에 비해 빠른 응답속도를 가지고 있다. 표 2.2는 BES의 응답속도를 100%로 보았을 때 다른 몇 가지 ESS들의 상대적인 응답속도를 보여주고 있다 [17].

표 2.2 ESS들의 응답속도 비교

Table 2.2 Comparison of response times of different ESSs

ESS 종류	상대적 응답속도(%)
PHES	100000
BES	100
FES	1~10
SCES	0.1~1
SMES	0.1~1

- 높은 출력: 그림 2.2는 ESS들의 출력과 방전지속시간을 나타내고 있다 [60]. 그림에서 알 수 있듯이 SMES는 PHES나 CAES와 같은 큰 규모의 ESS를 제외하면 가장 큰 출력을 보인다. 반면 방전지속시간이 짧기 때문에 에너지밀도는 높지 않지만, 고온 초전도 선재의 성능향상으로 이 부분에 대한 개선이 지속적으로 이루어지고 있다.

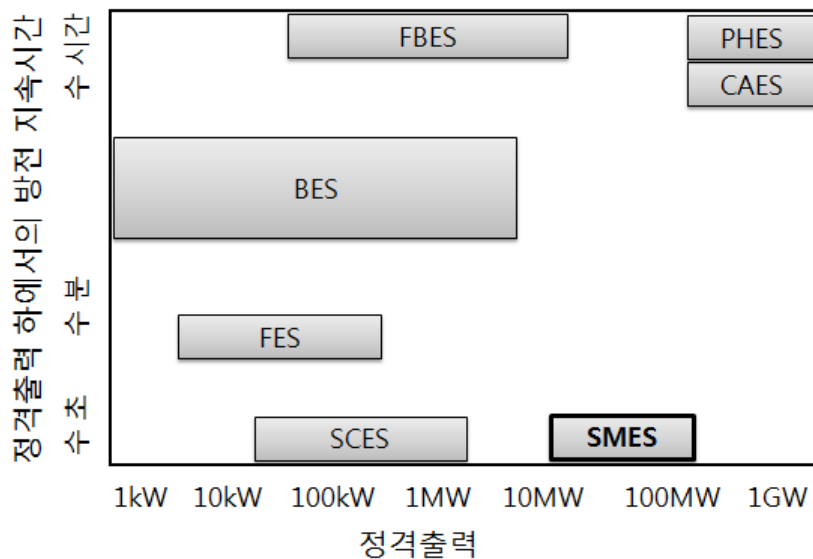


그림 2.2 ESS들의 출력과 방전지속시간 비교

Fig. 2.2 Comparison of power ratings and discharge time of different ESSs

위와 같은 장점 때문에 SMES는 1일 주기의 전력평준화보다는 순간적으로 큰 출력보상이 이루어져야 하는 응용분야에 매우 유용하다. 따라서 이러한 장점을 살릴 수 있는 방향으로 토로이드 SMES 코일을 설계하는 것이 중요하다. 코일 설계에서 효율에 영향을 미치는 것은 충방전 시의 교류손실이고, 이는 모듈에 가해지는 자장의 크기와 충방전 속도 등과 연관된다. 응답속도의 경우 SMES의 작동원리에 의해 보장되기 때문에 코일 설계와는 연관성이 적고, 주로 전력변환장치에 의해 결정된다. SMES의 저장 에너지는 다음과 같이 인덕턴스와 전류의 관계식으로 나타낼 수

있다.

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.2)$$

출력은 코일의 인덕턴스와 전력변환장치에 의해 결정되는데, 큰 출력을 확보하기 위해서는 코일의 인덕턴스를 감소시킬 필요가 있다. 따라서 가능한 범위 내에서 많은 전류를 흘리는 방향으로 설계를 진행할 필요가 있다.

2.2 SMES의 구성요소

SMES의 구성요소는 초전도 코일, 냉각 시스템, 전력변환장치 그리고 제어 시스템이 있으며, 이들 사이의 상관관계는 그림 2.3과 같다 [70].

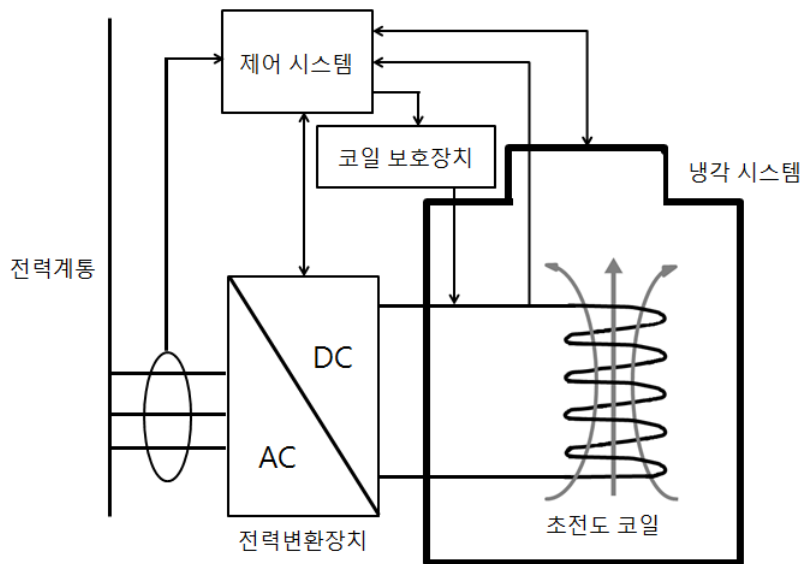
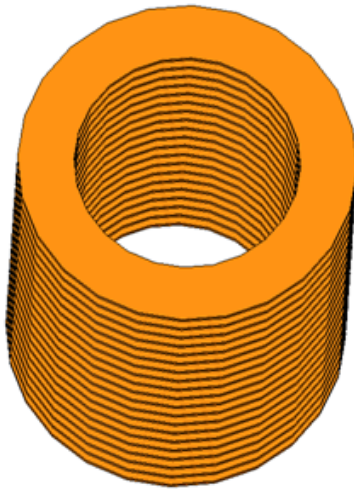


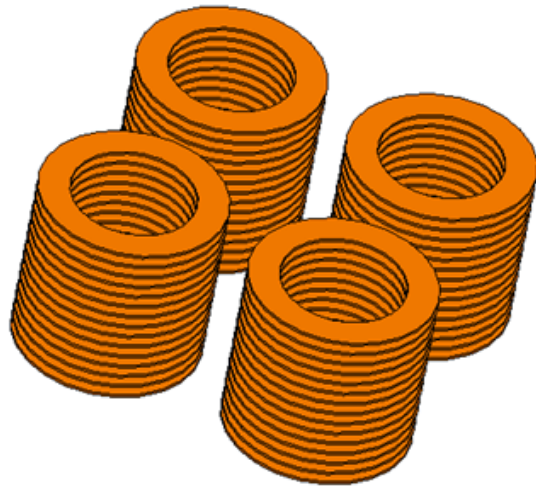
그림 2.3 SMES의 구성 요소

Fig. 2.3 Components of SMES

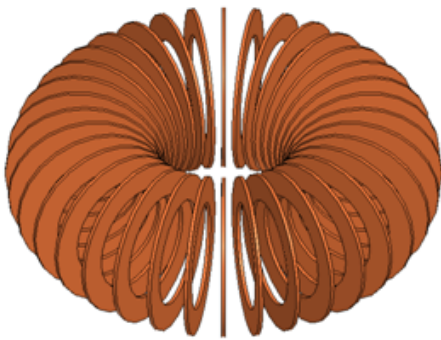
초전도 코일은 SMES의 가장 핵심적인 부분으로 에너지 저장 용량에 따라 크기나 형태가 다르다. 가장 기본적인 형상으로는 그림 2.4와 같은 솔레노이드형과 토로이드형이 있으며, 이들에 대한 변형으로 멀티폴 (Multi-pole), 레이스 트랙 (race track) 등이 있다.



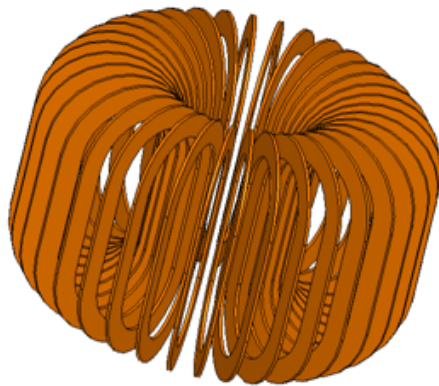
Solenoid



Multi-pole



Toroid



Race track

그림 2.4 여러 가지 타입의 SMES 코일

Fig. 2.4 Various types of SMES coil

냉각시스템은 초전도 선재 종류나 코일의 형상, 저장 에너지 규모 등에 따라 냉각방식이나 냉매 종류 등을 선택하여야 하고, 온도에 따라 민감하게 특성이 변화하는 초전도 선재의 특성 상, 우수한 온도조절 시스템을 갖추어야 한다. 이에 대한 자세한 설명은 3장에서 계속하도록 한다.

전력변환장치는 충전 시에는 전력계통에서 오는 AC 전류를 DC 전류로 바꾸어 초전도 코일에 공급하는 컨버터로 작동하고, 방전 시에는 초전도 코일에 흐르는 DC 전류를 AC전류로 바꾸는 인버터로 작동한다 [71]–[73]. SMES의 사이클 효율을 저하시키는 가장 큰 요인 중 하나가 바로 전력변환장치에서의 손실이기 때문에 고조파 왜곡과 손실이 적은 전력변환장치가 요구된다. 또한 인가된 전압과 초전도 코일의 전류변화 속도는 다음과 같은 식 (2.3)을 따르게 된다.

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (2.3)$$

여기서 I 는 초전도 코일에 흐르는 전류이며 V 는 전력변환장치에 의해 코일 터미널에 인가되는 전압이다. 따라서 SMES의 충방전 속도, 즉 전력 보상 성능은 전력변환장치의 성능에도 크게 좌우된다.

제어 시스템은 위에 열거된 각 구성요소와 전력계통으로부터 정보를 수집하여 각 구성요소를 제어한다. 전력변환장치의 충방전 제어, 냉각 시스템의 온도 제어 외에도, 초전도 코일에 이상 징후가 생겼을 때 빠르게 대처하여 코일의 영구적인 손상을 보호하는 코일 보호장치도 이 제어 시스템에 의해 관리된다 [74].

2.3 토로이드형 SMES와 솔레노이드형 SMES의 비교

토로이드형 SMES와 솔레노이드형 SMES는 SMES 연구 중 가장 많은 수를 차지하고 있는 코일 형상들이다. 이 둘의 성능에 대한 비교는 SMES 연구개발 초기부터 이루어져 왔으며, 이에 관한 논문들도 많이 출판되었다 [75]–[78]. 공통적인 의견으로는 솔레노이드형의 경우 구조가 간단하여 설계가 쉽고, 구조물 제작이 용이하지만, 그림 2.5와 같이 표류자장(stray field)을 막지 못해 상당히 큰 크기의 자장이 외부로 새어나가는 단점이 있다는 것이다. 강자성체를 이용하여 표류자장을 차폐하는 방법을 사용할 경우 차폐물의 포화 방지를 위해 코일로부터 멀리 떨어진 곳에 설치할 필요가 있기 때문에 시스템의 부피가 커지는 부작용이 있다. 또 다른 해결책으로 멀티폴 구조를 이용하여 외부자장 크기를 줄이는 방법이 있으나, 완전히 없애기는 힘들며 부피가 커지는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 가장 이상적인 방법으로 토로이드형 SMES가 거론되고 있다. 이상적인 토로이드 코일은 완전히 자장을 토로이드 내부에 가둘 수 있으며, 토로이드형 SMES의 경우에도 그림 2.6과 같이 표류자장의 크기가 매우 작다. 이러한 장점은 인구 밀집 지역에 SMES를 설치해야 하는 경우나 시스템의 부피에 제한이 있는 경우 특히 중요시 된다.

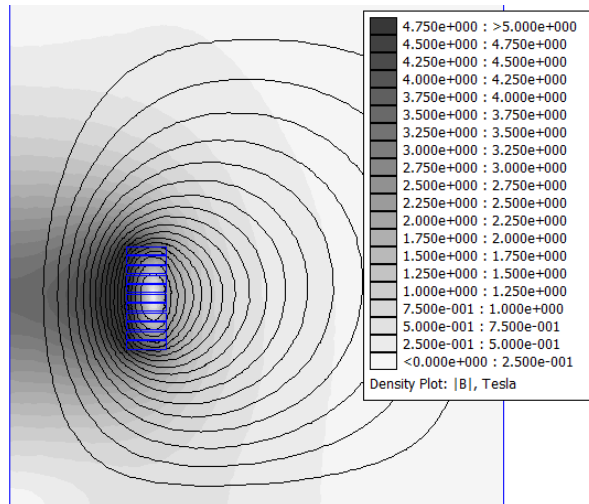


그림 2.5 솔레노이드형 SMES의 자속밀도 분포

Fig. 2.5 Flux density distribution of solenoidal SMES

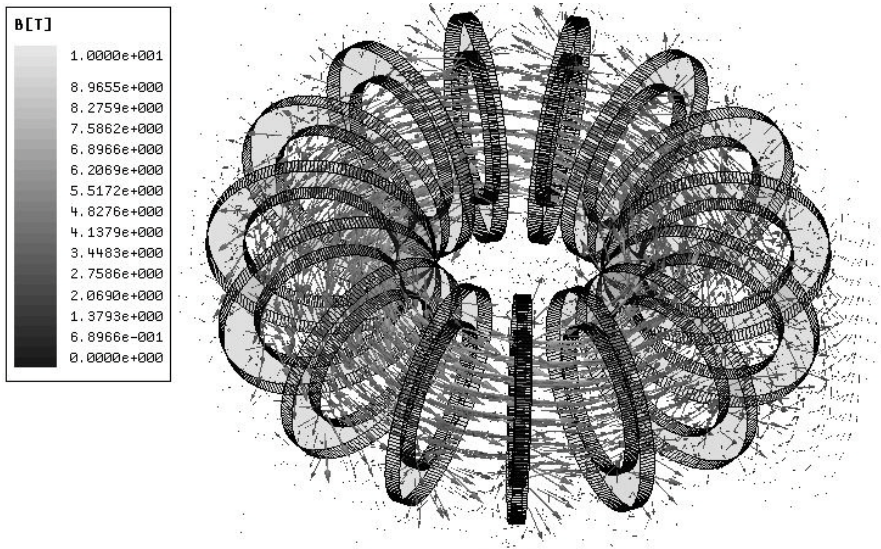


그림 2.6 토로이드형 SMES의 자속밀도 분포

Fig. 2.6 Flux density distribution of toroidal SMES

이와 같이 뚜렷한 장점을 가진 토로이드형이지만, 솔레노이드형보다 에너지밀도가 낮아 소요되는 선재길이가 더 길다는 연구결과가 있다 [75]–[76]. 하지만 고온 초전도 선재의 경우 수직자장에 매우 취약한 특성을 가지고 있는데, 토로이드형은 솔레노이드형보다 선재에 가해지는 수직자장 크기가 더 작기 때문에 초전도 선재를 더 효율적으로 사용할 수 있다는 견해도 존재한다 [48]. 또한 솔레노이드형의 외부자장 문제를 해결하기 위해 멀티폴을 사용할 경우 토로이드형보다 에너지밀도가 떨어진다는 연구결과가 존재한다. 따라서 토로이드형 SMES의 단점을 극복하기 위해서는 선재에 가해지는 수직자장을 최소화하는 방향으로 설계를 진행하여야 한다. 이러한 설계 여하에 따라 선재 소모량의 차이가 줄어들거나 거의 없어질 가능성이 있고, 앞에서 언급된 장점을 고려하면 많은 응용범위에서 토로이드형 SMES가 더 좋은 선택이 될 수 있을 것이다.

제 3 장 토로이드형 SMES 코일 설계기법

3.1 고온 초전도 선재

고온 초전도 선재는 생산자가 한정되어 있고, 생산에 많은 시간과 비용을 소요하며, 선택할 수 있는 선재의 종류가 적기 때문에 설계에 맞추어 원하는 형상의 선재를 제작 또는 주문하기가 힘들다. 따라서 일반적인 전기기기가 형상 설계 과정에서 코일 단면적과 절연 방법 등을 비교적 자유롭게 설정하는 것과는 달리, SMES의 경우에는 주문생산이 가능한 선재들 중에서 비용과 성능을 고려하여 설계에 사용할 선재를 미리 선택하고 그에 맞추어 설계를 진행하는 것이 현실적이다 [19]–[22].

본 절에서는 고온 초전도 선재를 선정할 때에 고려해야 할 점과 현재 개발되고 있는 주요 고온 초전도 선재에 대해 설명한다.

3.1.1 초전도 상태 유지를 위한 임계 조건

초전도 선재가 초전도 상태를 유지하기 위해서는 전류, 자속밀도, 온도 이렇게 세가지 요소가 만족되어야 한다. 초전도 선재들은 그림 3.1과 유사한 특성 곡면을 가지게 되는데, 동작점이 이 곡면의 아래일 경우에만 초전도 상태를 유지할 수 있다. 냉각 시스템의 부담을 최소화하고 선재의 성능을 최대한 발휘시키기 위해서는 동작점이 곡면에 근접한 부분에 위치하도록 설계하게 되는데, 이때 어떠한 이유로든 전류, 자속밀도, 온도 중 어느 하나가 증가하여 동작점이 임계곡면 위로 올라가게 된다면 초전도

특성을 잃어버리는 켄치 (quench) 현상이 일어나게 된다. 초전도 선재의 극히 작은 부분에서라도 켄치 현상이 일어나면, 이로 인해 생긴 저항과 흐르고 있던 커다란 전류로 인해 줄 발열 (Joule heating)이 발생하는데, 이때 코일보호장치가 신속히 전류를 차단하는 등의 조치를 취하는 데에 실패한다면 온도가 상승하면서 다른 부분으로 켄치 현상이 퍼져나간다. 이는 SMES의 이상동작이나 선재의 영구적인 손상을 유발하는 등 심각한 문제를 초래한다 [79] - [85].

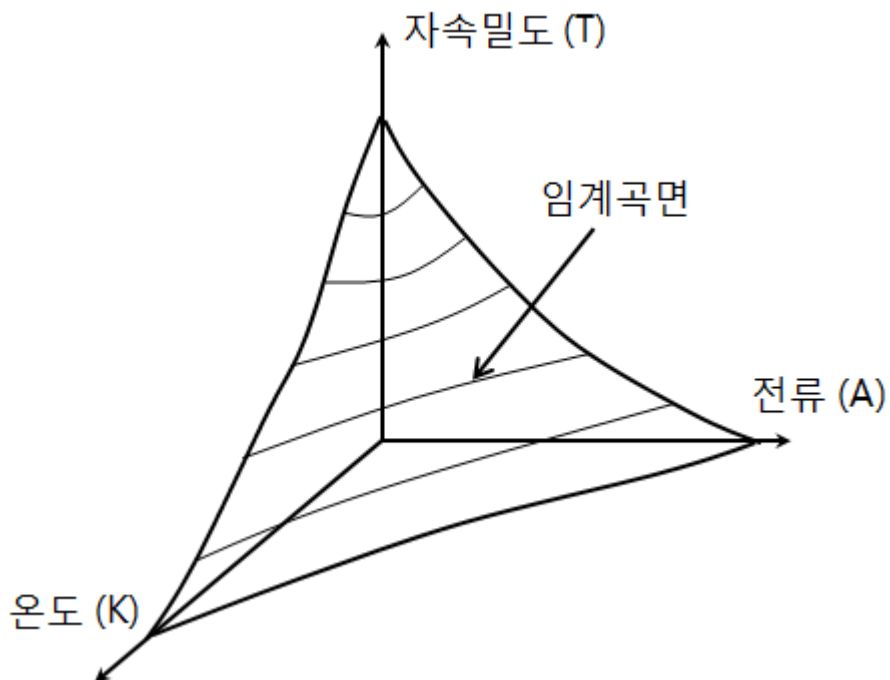


그림 3.1 초전도 선재의 임계곡면

Fig 3.1 Critical surface of superconductor wire

또 한가지 주목할 점은 임계전류와 임계온도와는 달리 선재의 임계 자속밀도는 이방성을 가진다는 것이다. 그림 3.2에서는 초전도 선재에 가해지는 자장을 수평자장과 수직자장으로 나누고 있는데, 이 자장들로 인한 임계전류 값을 그림 3.3에 나타내었다. 고온 초전도 선재는 특히 이러한 이방성이 두드러지게 나타나기 때문에 선재에 가해지는 자장의 크기뿐만 아니라 방향도 중요해 진다.

임계전류, 임계자속밀도, 임계온도는 SMES 설계가 상전도 전기기기 설계와 차별점을 갖는 가장 중요한 요소 중 하나로, 설계과정에 직, 간접적으로 영향을 미친다.

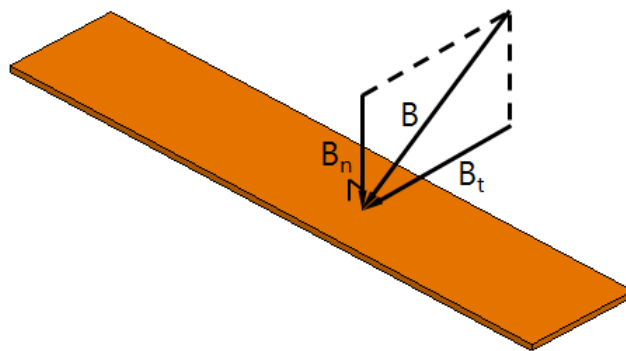


그림 3.2 초전도 선재에 가해지는 수평자장과 수직자장

Fig 3.2 Parallel and perpendicular flux on superconducting wire

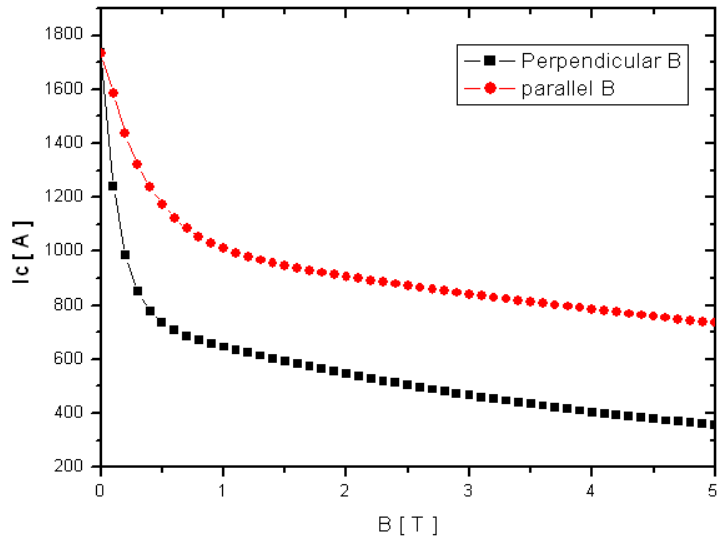


그림 3.3 수평, 수직 자속밀도에 따른 고온 초전도 선재의 임계전류

Fig 3.3 Critical current of HTS wire under different parallel and perpendicular flux density

3.1.2 기계적 특성

초전도 선재의 기계적 특성 중 주로 고려되어야 할 요소는 최대 인장응력, 최대 인장변형, 최소 곡률반경이 있다.

초전도 선재에 전류가 인가되면 로렌츠 힘 (Lorentz force)으로 인하여 선재에 그림 3.4와 같은 후프 응력 (hoop stress)이 가해지게 된다. 이러한 응력이 선재가 버틸 수 있는 최대 인장응력을 초과하거나 응력으로 인한 선재의 변형이 최대 인장변형을 넘어설 경우, 선재의 영구적인 변형이나 파괴가 일어난다.

최소 곡률반경은 SMES에서 모듈의 최소 내경에 제한을 주지만, 대부

분 수십 mm 이상의 값을 가지기 때문에 소형 SMES 설계시에 주로 고려된다.

기계적 강도가 높고 유연한 초전도 선재는 SMES의 설계 자유도를 높이고, 제작이 용이해지지만, 산화물계 초전도체에서 특히 구현하기 어려운 특성이다. 이를 해결하기 위해 선재의 외피에 은과 마그네슘 합금을 이용하는 방법을 쓰기도 하지만, 기본이 되는 은의 기계적 강도가 약하여 합금화하는 것에도 한계가 있다. 또 다른 방법으로 선재에 얇은 금속판을 부착하여 기계적 강도를 증가시키는 방법을 사용하고 있으며, 표 3.1은 각기 다른 재료의 금속판 적층재를 이용한 초전도 선재의 기계적 특성 데이터의 예이다.

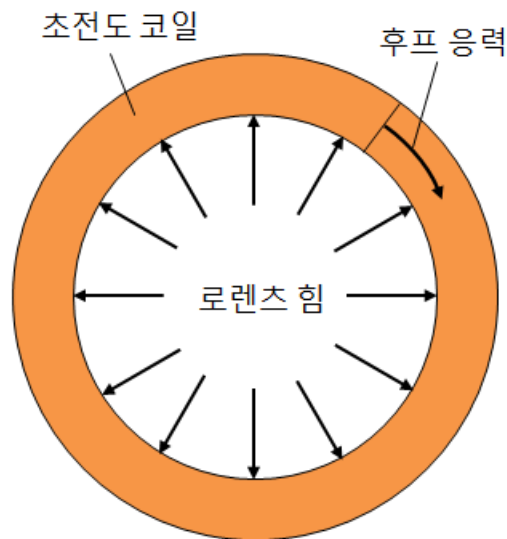


그림 3.4 초전도 코일의 로렌츠 힘과 후프 응력

Fig. 3.4 Lorentz force and hoop stress of superconducting coil

표 3.1 적층재에 따른 고온 초전도 선재의 기계적 특성

Table 3.1 Mechanical characteristic of HTS wires with different laminate material

	Brass laminated	Copper Laminated	Stainless Steel Laminated
Average thickness (mm)	0.36~0.44	0.18~0.22	0.22~0.28
Minimum width (mm)	4.24	11.9	11.9
Maximum width (mm)	4.55	12.3	12.3
Minimum double bend diameter (mm)	35 ⁱ	30 ⁱ	70 ⁱ
Maximum rated tensile stress (Mpa)	200 ⁱ	150 ⁱ	200 ⁱ
Maximum rated wire tension (kg)	30 ⁱ	30 ⁱ	48 ⁱ
Maximum rated wire strain (%)	0.3 ⁱ	0.3 ⁱ	0.3 ⁱ

AMSC사 제공

i: Greater than 95% I_c retention

3.1.3 BSCCO와 YBCO 선재

현재 연구 및 생산되고 있는 고온 초전도 선재는 1980년대 중 후반에 발견된 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO-2223)와 $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 산화물이 기초가 된다. 이들은 우수한 임계온도와 임계자기장 특성을 가지고 있기 때문에 많은 관심을 받고 있지만, 산화물의 특성상 기계적 강도가 약하기 때문에 선재형태로의 가공에 어려움을 겪었다.

이에 최초로 성공한 방법은 BSCCO-2223 산화물을 금속 은 피복관에 채운 후 인발, 압연 방법으로 테이프 형태로 가공하는 Powder in Tube (PIT)법이다. 이렇게 생산된 선재는 1세대 고온 초전도 선재로 불리며, 1990년대 중반부터 2000년대 초반까지 미국의 AMERICAN SUPERCONDUCTOR (AMSC), SuperPower, 일본의 Sumitomo Electric, 유럽의 NKT cables, 중국의 InnoST등 여러 회사가 생산에 들어갔다 [81]. 하지만 BSCCO 선재는 자장 증가에 따른 임계전류 감소가 커서 SMES에 응용하기 위해서는 40K 이하의 낮은 온도에서 운전해야 한다. 또한 기계적 강도가 약하고, 은의 비저항이 낮아 교류손실에 취약하며, 고가금속인 은이 상당부피를 차지하기 때문에 원가절감이 어렵다 [86]–[87].

YBCO는 세라믹결정의 특성인 취성과 결정학적 이방성을 지니고 있기 때문에 선재로서의 사용을 위해서 그림 3.5과 같이 금속 모재위에 여러 층의 세라믹스와 금속 박막층을 적층하여 제작된다. 이렇게 생산되는 선재를 YBCO Coated Conductor (CC)라고 부르며, 2세대 고온 초전도 선

재로도 불린다. 완성된 초전도체는 용도에 따라 적절한 폭으로 세단하여 공급되며 응용분야에 따라 기계적 강도를 보강하기 위해 얇은 금속판재를 붙이기도 한다. YBCO CC 생산기술은 아직 발전단계이며 현재도 많은 연구그룹들이 선제 생산기술 개발에 집중하고 있다.

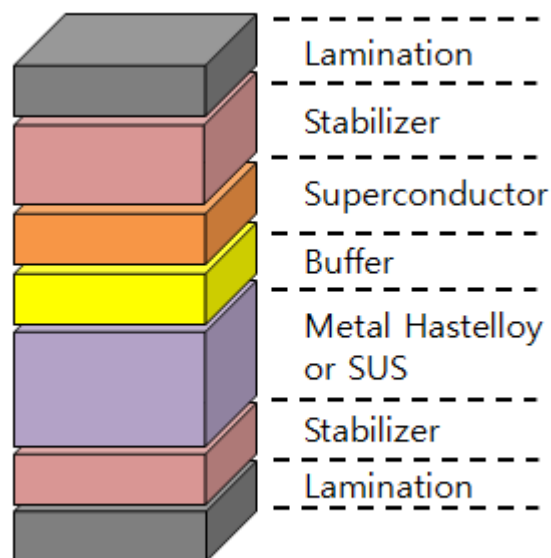


그림 3.5 YBCO Coated Conductor의 구조

Fig. 3.5 Architecture of YBCO Coated Conductor

3.2 냉각시스템

초전도 시스템을 위한 극저온 냉각 방식에는 크게 액체 냉각방식과 전도 냉각방식이 있다.

액체 냉각방식은 초전도 코일을 액체 헬륨이나 액체 질소 등의 극저온 냉매 안에 담근 후, 냉매를 순환시켜 냉각시키는 직접냉각방식이다. 고온 초전도 선재가 개발되기 이전에는 4K 부근으로 온도를 낮추기 위해 액체 헬륨이 주로 냉매로 사용되었으나, 고온 초전도 선재의 경우에는 값싼 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있기 때문에 현재도 많이 선택되고 있는 냉각방식이다. 이 냉각방식은 초전도 시스템에 열적 교란으로 인한 발열이 일어날 경우 초전도 표면에서 저온 액체의 비등을 통한 열전달이 이루어지므로, 단위 면적당 열전달이 매우 크고, 일정한 압력 하에서의 냉매의 포화 온도로 온도를 일정하게 유지할 수 있어 안정성이 우수하다는 장점이 있다. 하지만 냉매의 저장 및 이송에 따른 열 손실이 있고, 저온 액체 용기에 대한 열부하로 냉각 시스템 효율이 떨어지며, 시스템의 소형, 경량화가 어렵다.

전도 냉각방식은 극저온 냉동기의 저온부에 냉각 대상을 직간접적으로 접촉시켜 냉각하는 간접냉각 방식이다. 전원공급이 가능한 곳이면 어디에서나 초전도 시스템을 운전할 수 있고, 저온 액체에 대한 전문 인력 및 장비가 필요 없으며, 액체의 저장이나 순환에 따른 열손실을 줄일 수 있다. 또한 시스템의 소형, 경량화가 가능하며, 설치 위치나 각도에 대한 자유도가 높다. 하지만 전도 냉각은 극저온 냉동기의 냉동 특성과 초전도

도체의 발열 특성에 의해 온도가 크게 변할 수 있어 열적 안정성이 떨어진다.

이외에도 고체 아르곤, 네온, 수소, 질소 등의 고화 냉매를 이용하는 냉각방식도 대두되고 있는데, 특히 질소는 응고점이 63.15 K로 높고, 고체 상에서 큰 비열을 가지고 있어 외부전원이나 냉각시스템에서 분리되어도 상당 시간 동안 초전도 상태를 유지시킬 수 있다. 따라서 야외나 지속적인 냉매공급이 곤란한 야외나 함정, 우주왕복선 등에서 응용 가능할 것으로 기대되고 있지만 아직 많은 연구가 필요한 것으로 평가되고 있다.

코일 설계의 관점에 있어서는 전도냉각이 비교적 넓은 범위에서 온도설정이 가능하기 때문에 선택한 선재를 원하는 온도에서 운전시킬 수 있어 실험 및 개발과정에서 유용하게 쓰일 것으로 생각된다. 전도 냉각 장치로는 선재의 자속밀도에 대한 임계전류 특성이 우수한 20 K 부근으로 온도조절이 가능하기 때문에 SMES의 선재 이용 효율을 높일 수 있다. 하지만, 열 안정성이 낮아 손실로 인한 열에 영향을 받을 가능성이 있기 때문에 이에 대한 고려를 할 필요가 있다.

3.3 코일 설계변수 설정

토로이드형 SMES 코일의 설계변수는 크게 선재특성 변수, 형상 변수, 전류밀도로 나눌 수 있다.

선재특성 변수의 경우 원하는 특성을 가지는 선재를 주문 생산할 수 있는 경우는 거의 없기 때문에, 초전도 선재 생산자로부터 주어지는 선재 중 한가지를 선택하게 되는데, 이때 임계전류, 임계자장, 임계온도 등의 선재 특성이 특정되게 된다. 동작전류와 자장은 형상에 따라 계속해서 변하기 때문에 이 단계에서 설계자가 고정시킬 수 있는 변수는 온도뿐이다. 냉각의 방식이나 선재의 특징에 따라 목표 온도를 설정한 후에는 그림 3.3과 같은 온도 특성 곡선을 구할 수 있다.

형상변수의 경우, 토로이드형 SMES는 솔레노이드형 SMES에 비해 더 다양한 변수가 존재한다. 그림 3.6은 고려될 수 있는 토로이드형 SMES 코일의 형상변수들을 보여주고 있다. 그림에서 N_p 는 모듈의 수이며, N 은 모듈 하나에 감기는 선재의 턴 수이다. 또한 w_{wire} 와 h_{wire} 는 각각 설계에 사용되는 초전도 선재의 폭과 두께이다.

여기서 h 는 그림 3.6에서 알 수 있듯이 선택된 선재의 폭에 따라 정해지기 때문에 최적설계변수에서 제외시킬 수 있다.

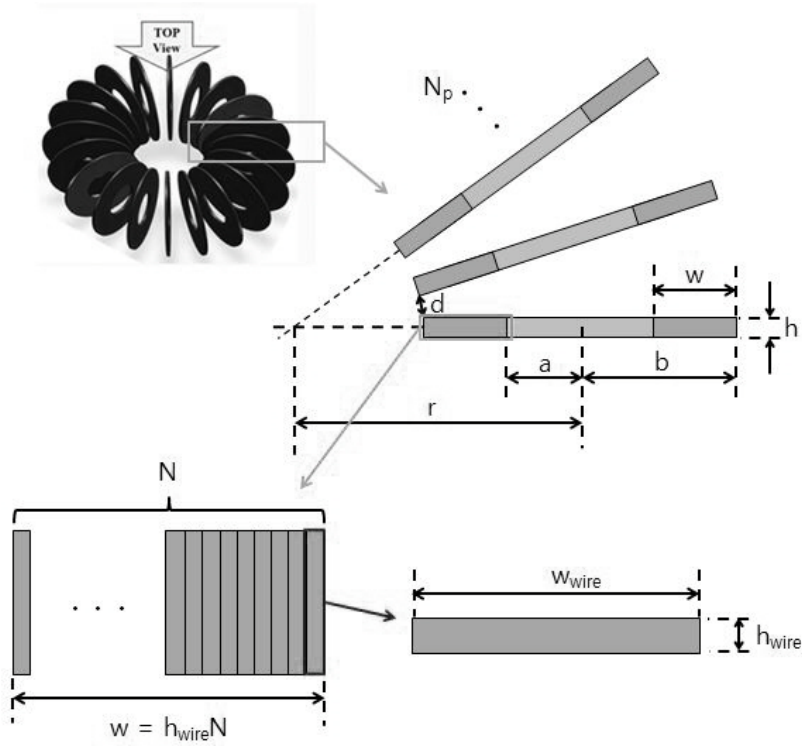


그림 3.6 토로이드형 SMES 코일의 형상 변수

Fig. 3.6 Dimensional variables of toroidal SMES coil

모듈 간의 최소 간격인 d 는 중심에서 모듈까지의 거리인 r 과 모듈 수 N_p 가 정해지면 고정되게 된다. 여기서 고려해 볼 점이 있는데, 토로이드형 SMES는 모듈 사이의 거리가 가까우면 가까울수록 외부 누설자속이 작아지고, 선재에 가해지는 수직자장 크기도 작아지게 된다. 하지만 모듈 사이에는 지지구조물이 들어갈 공간이 필요하며, 또한 d 가 지나치게 작을 경우, 모듈 사이의 힘이 증가하여 지지구조가 버티기 힘들어진다. 이 때

문에 설계시작 단계에서 d 를 일정한 범위 내로 제한하고, 이에 맞추어 최대한 많은 모듈을 넣도록 설계하는 경우도 많다. 따라서 d, r, a, N_p 는 상호관계를 가지며, 설계 방향에 따라 선택되는 최적설계 변수가 달라지게 된다. 본 연구에서는 모듈 사이의 폭이 넓어지는 경우도 상정하고 있기 때문에 d 는 고정되지 않고 최소값을 제한조건으로만 사용한다.

모듈의 코일 부 폭 $w=b-a$ 는 선재의 두께 h_{wire} 와 선재 턴 수 N 으로 나타낼 수 있다. 선재의 두께는 최적설계 과정 이전에 정해지기 때문에 w 와 N 값에 따라 h_{wire} 를 조절할 수는 없어서 w 보다는 N 을 설계변수로 고르는 것이 바람직하다.

이러한 고려를 걸쳐 최종적으로 선택되는 설계변수는 표 3.2와 같다.

표 3.2. 토로이드형 SMES 코일 설계변수

Table 3.2 Design variables of toroidal SMES coil

기호	설명	단위
N_p	모듈 수	개
r	토로이드 중심부터 모듈 중심까지의 거리	mm
a	모듈의 내반경	mm
N	모듈 당 선재의 턴 수	턴
I	턴 당 전류	A

3.4 에너지 계산

SMES의 설계에 있어서 저장 에너지의 크기는 가장 기본이 되는 설계 목표라고 할 수 있다. 따라서 설계의 흐름에 있어서도 에너지 계산을 출발점으로 하는 경우가 많다 [19]–[21].

에너지 계산은 다음과 같은 기본적인 식으로 시작된다.

$$E = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \cdot \vec{H} dV \quad (3.1)$$

따라서 에너지 밀도 식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$e = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \quad (3.2)$$

여기서 B_0 는 모듈의 중심 자속밀도이다. 토로이드의 내부 체적은

$$V = \pi a^2 \cdot 2\pi r \quad (3.3)$$

이므로, 전체 토로이드에 저장되는 에너지는 다음과 식으로 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \cdot \pi a^2 \cdot 2\pi r \quad (3.4)$$

즉, a 와 r 이 정해졌을 때, 다른 변수의 조절을 통해 중심 자속밀도가 B_0 가 되도록 하여야 목표 저장 에너지를 달성할 수 있다.

3.5 중심자장 계산

원하는 중심 자속밀도를 얻기 위해 어떤 설계값이 필요한지 알기 위해서 설계변수와 중심 자속밀도 간의 상관관계를 식으로 나타낼 필요가 있다.

Ampere 의 법칙에 따라 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$\oint B_0 r d\phi = B_0 2\pi r = \mu_0 NI \quad (3.5)$$

따라서 B_0 는 식 (3.6)과 같이 정리된다.

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \quad (3.6)$$

이 식을 이용하면 r 을 결정했을 때, 원하는 중심 자속밀도를 얻기 위한 NI 값을 구할 수 있게 된다.

단, 이 식들은 이상적인 토로이드 코일을 가정하여 전개된 식들이고, 모듈형의 경우 이상적인 토로이드 코일과는 달리 선재가 균일하게 감겨있지 않기 때문에 국지적으로 B_0 에 변화가 있을 수 있다. 이에 대한 영향을 알아보기 위해 모듈 수, 즉 모듈 사이의 간격을 바꾸면서 B_0 의 변화를 살펴보았다. B_0 의 계산은 유한요소해석을 사용하였으며, 그림 3.7 과 같이 주기모델을 이용하여 해석하였다.

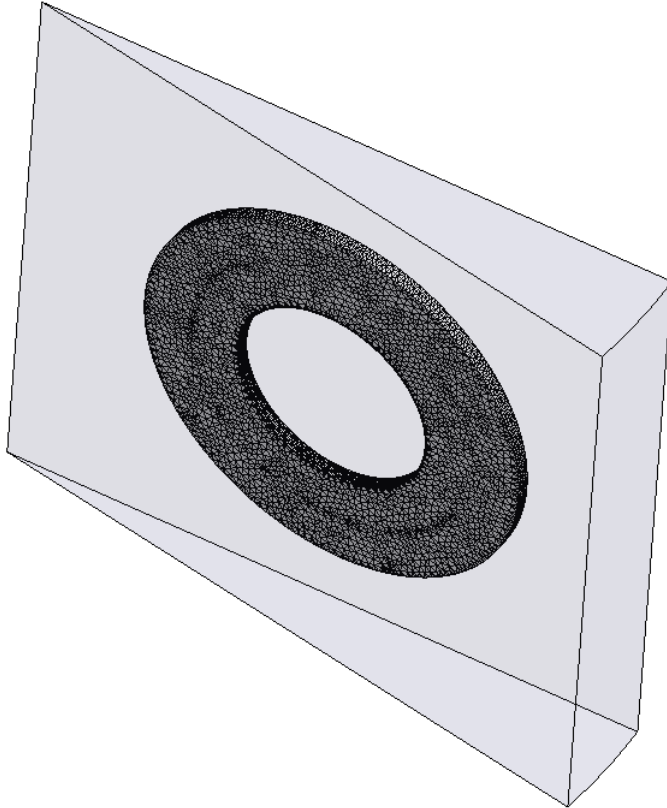


그림 3.7 토로이드형 SMES 모델 주기모델

Fig. 3.7 Periodic model of toroidal SMES

해석된 모델들 중 그림 3.8 과 같이 r 이 387mm, I 가 960A, 총 권선 턴 수가 10800 턴이고 모듈 수가 12, 16, 24, 36 인 모델들에 대해서 해석한 결과를 그림 3.9 에 나타내었다. 이들은 각각 다른 모듈 수를 가진

토로이드들의 중심을 따라 360 도 동안 B_0 가 어떻게 변화하는지 보여주고 있다.

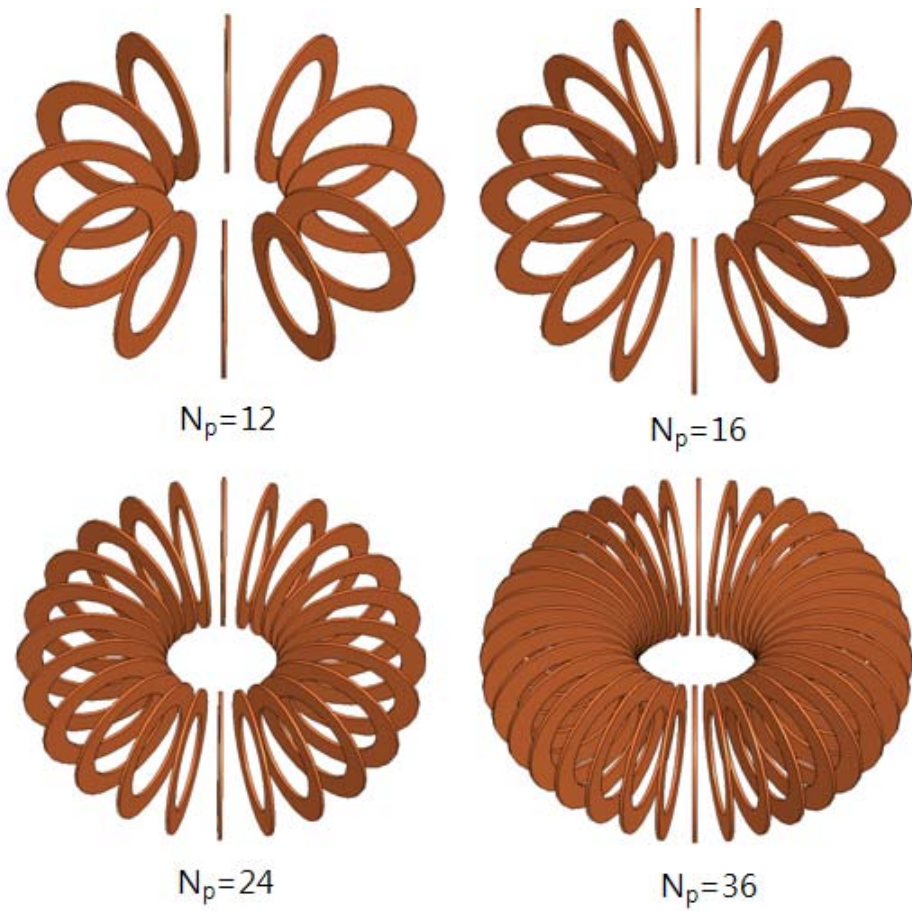
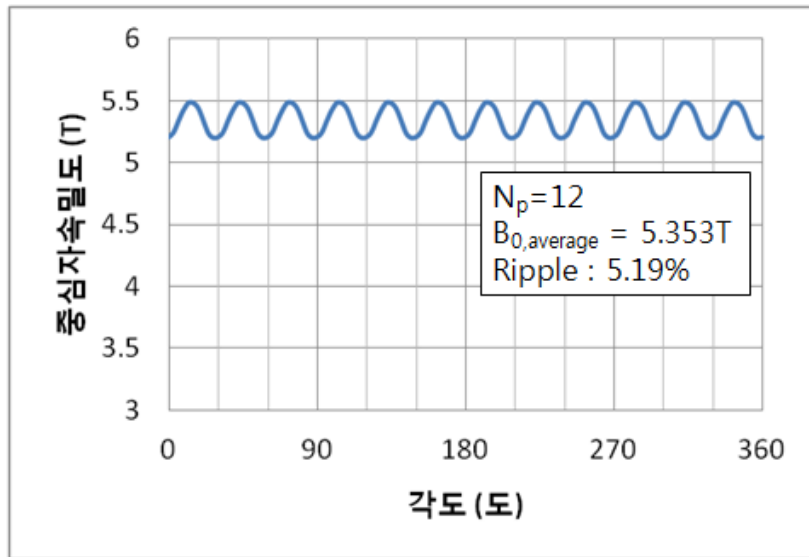
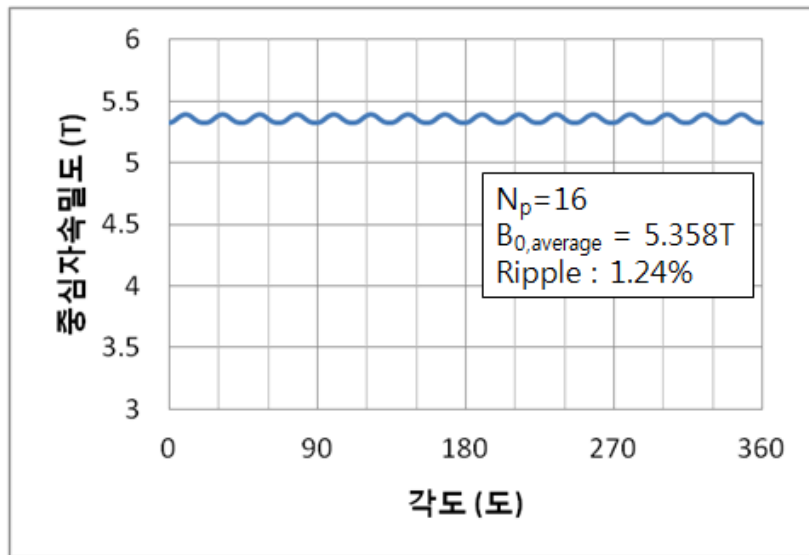


그림 3.8 다른 모듈 수를 가지는 토로이드형 SMES 모델

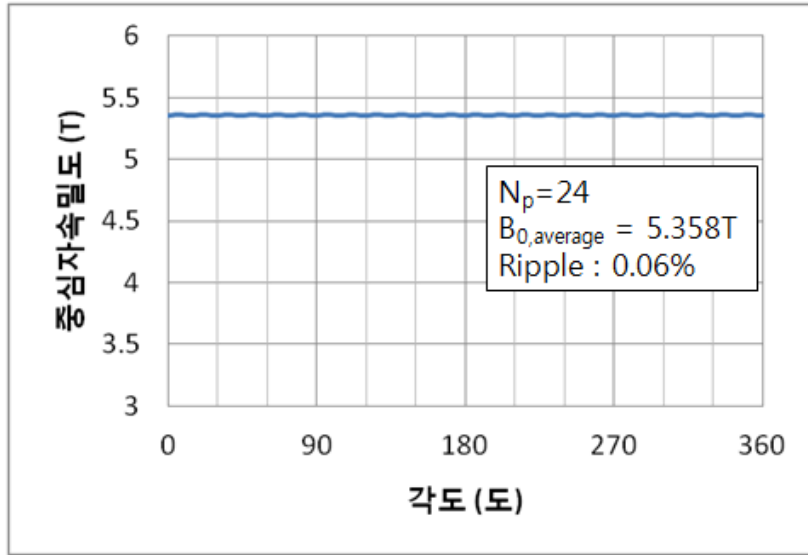
Fig. 3.8 Toroidal SMES with different number of module



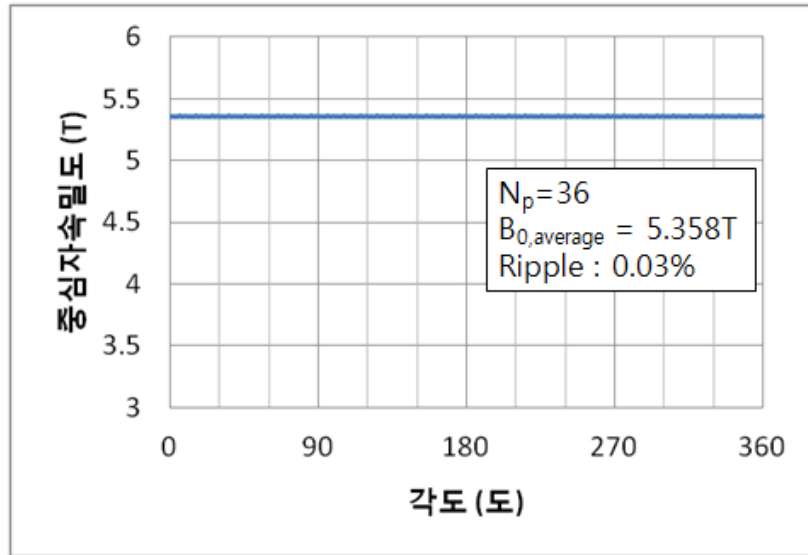
(a) $N_p=12$



(b) $N_p=16$



(c) $N_p=24$



(d) $N_p=36$

그림 3.9 각기 다른 모듈 수에 대한 B_0 분포 변화

Fig. 3.9 Distribution of B_0 with different number of modules

주어진 a, r 을 이용하여 식 (3.6)을 통해 계산된 B_0 는 5.358T 인데, 각 모델의 평균 B_0 는 이 값과 거의 같음을 알 수 있다. 또한 N_p 가 12 일 때와 같이 극단적으로 모듈 사이의 거리가 큰 경우를 제외하면, 중심자장 분포의 리플은 매우 작은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (3.6)을 이용한 토로이드형 SMES 의 B_0 계산이 정확하다는 것을 알 수 있다.

3.6 턴 수 및 전류크기 결정

식 (3.6)으로부터 NI 값을 정할 수는 있지만, N 과 I 각각의 값은 정해지지 않는다. 전류값이 클수록 턴 수 N 이 작아지면서 선재량을 절감할 수 있기 때문에 초전도 선재의 임계전류에 가까운 값으로 정하는 것이 바람직하다. 하지만 초전도 선재의 임계전류는 3.1 절에서 언급했듯이 온도 및 자장크기에 따라 비선형적으로 변화한다. 온도가 냉각 장치의 제어를 통해 유지될 수 있다고 할 때, 결국 임계전류에 영향을 미치는 요소는 선재에 가해지는 자장의 크기만 남게 된다. 하지만 선재에 가해지는 자장의 크기는 형상, 전류크기에 따라 비선형적으로 바뀌게 되고, 이에 따라 마찬가지로 비선형적으로 바뀌는 임계전류값에 맞추어 한 번에 가장 우수한 설계안을 도출하는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 이를 해결하기 위해 그림 3.10 과 같은 순서도를 통해 N 과 I 를 결정하게 된다.

순서도의 첫 번째 스텝에서는 초기 전류를 결정한다. 초기 전류는 수렴 속도를 위해 적절한 크기로 설정하는 것이 바람직한데, 선재에 가해지는 자장의 크기는 아직 알 수 없지만 중심자장과 비슷한 스케일을 가질 것을 예상할 수 있기 때문에, B_0 의 자속밀도 하에서의 선재 임계전류에 가까운 전류를 시작점으로 하는 것이 좋다.

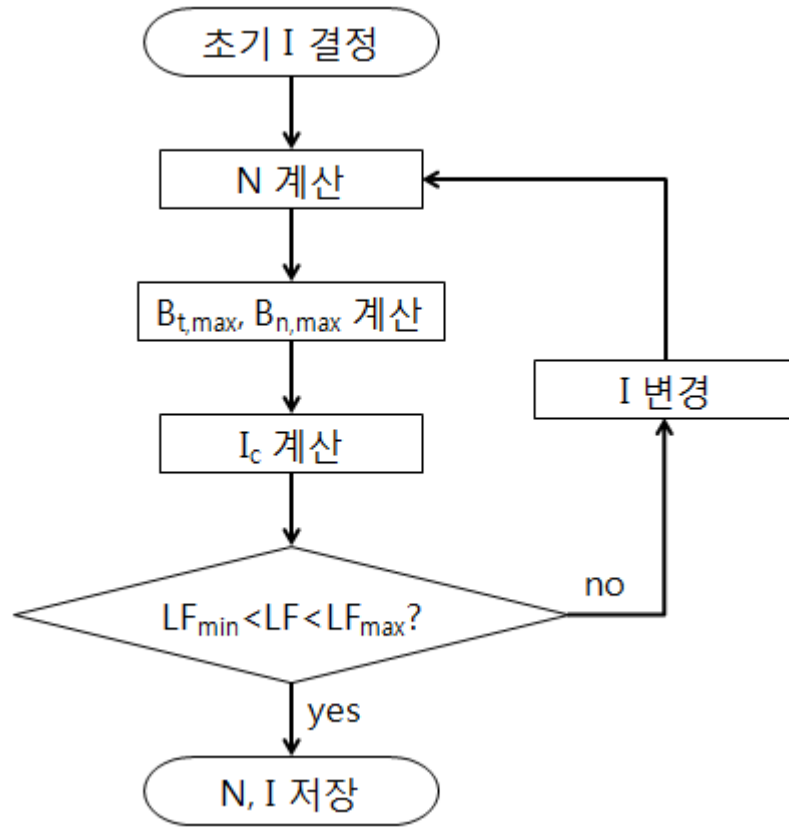


그림 3.10 N 과 I 를 결정하기 위한 순서도

Fig. 3.10 Flow chart for deciding N and I

N 과 I 의 곱 값인 NI 는 앞 단계에서 목표 중심 자속밀도 B_0 를 통해 구하였기 때문에 정해진 I 를 통해 N 의 값 또한 결정된다. 이 단계에서 설계변수인 N_p, r, a, N, I 가 모두 정해지므로 해석 가능한 모델이 만들어진다. 이 모델을 통해 얻어야 하는 정보는 선재에 가해지는 최대 수평, 수직 자속밀도 $B_{t,max}, B_{n,max}$ 이다.

다음 단계로 해석을 통해 얻어진 자장크기 하에서의 선재가 어떤 임계 전류 I_c 를 갖는지 그림 3.3 과 같은 선재 특성 그래프에서 보간법을 이용해 얻어낸다.

이후에는 load factor (LF) 값의 비교를 통해 모델의 유효성을 판단한다. LF 는 다음과 같이 정의된다.

$$LF = \frac{I}{I_c} \quad (3.7)$$

LF_{min} 과 LF_{max} 는 각각 설계 상 허용가능한 최소, 최대 LF 값이다. LF 가 LF_{max} 보다 크다면 이 모델은 외란 등의 이유로 켄치 현상을 일으킬 위험이 크다는 것을 말한다. 반대로 LF 가 LF_{min} 보다 작다면 선재를 충분히 효율적으로 사용하지 못하고 있어 선재 낭비가 일어나고 있다는 것을 뜻한다. 전자라면 모델의 전류를 줄여야 하며, 후자라면 반대로 전류를 증가시킬 필요가 있다. 이렇게 I 를 변화시키면서 목표 LF 범위를 만족시키는 모델을 찾을 때까지 위의 과정을 반복한다.

3.7 최대 수평, 수직 자속밀도 데이터 테이블 구축

그림 3.10 의 순서도에서 N 과 I 를 결정하기까지는 많은 반복과정을 거치는 것이 불가피한데, 문제는 이 과정에서 수직자장과 수평자장의 계산이 필요하다는 것이다. 형상이 완전히 동일한 상태에서 전류크기만 변화한다면 공기의 투자율이 일정한 것을 이용하여 첫 모델의 결과로부터 선형적으로 수직자장과 수평자장을 유추할 수 있겠지만, I 에 연동하여 변화하는 N 은 모델의 형상에 영향을 끼친다. 하지만 매번 수치해석을 이용한다면 N 과 I 를 결정하는 과정에서만 수십에서 많게는 수백 번의 3D 수치해석이 필요하게 된다. 이는 토로이드형 SMES 코일의 설계에 많은 시간이 소요되는 결정적인 요소가 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 선재에 가해지는 최대 수평, 수직 자장의 데이터를 미리 테이블로 구축하여 빠르게 모델을 결정할 수 있도록 한다. 데이터 테이블 구축을 위한 자장 해석결과는 3D FEM 프로그램을 이용하여 얻었다. 단순히 생각했을 때, 데이터 테이블의 입력 변수는 N_p , r , a , N , I 가 되고, 출력 변수는 선재에 가해지는 최대 수평 자속밀도 $B_{t,max}$ 및 최대 수직 자속밀도 $B_{n,max}$ 가 된다. 하지만 이 경우 지나치게 큰 데이터 테이블이 필요하게 되며, 다른 에너지 스케일이나 규모의 토로이드형 SMES 의 개발 시에는 활용이 불가능하게 된다. 따라서 토로이드형 SMES 내부에서의 자장분포를 관찰을 통해 테이블 구성 변수들에 대한 정리가 필요하다.

3.7.1 최대 자장 데이터 수집 위치

그림 3.11 은 토로이드형 SME 코일을 위에서 내려다 보았을 때의 전체 자장분포를 나타내고 있는데, 토로이드의 안쪽에서 자속밀도가 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 선재에 가해지는 자장의 분포를 살펴보기 위해 모듈의 중심 단면에서 자속밀도 분포를 따로 살펴본 것은 그림 3.12 와 같다.

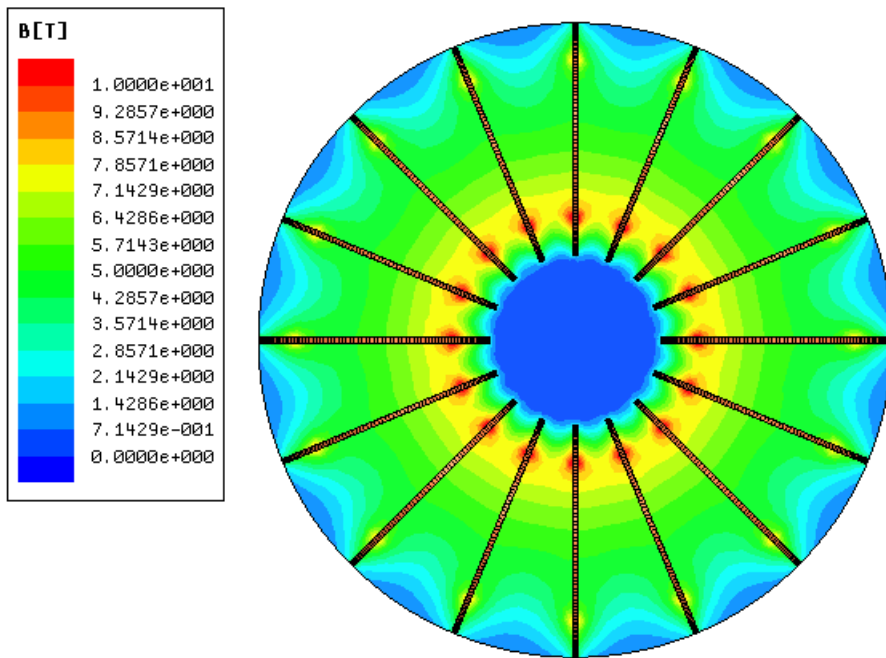


그림 3.11 토로이드 전체에서의 자속밀도 분포

Fig. 3.11 Flux density distribution of entire toroid

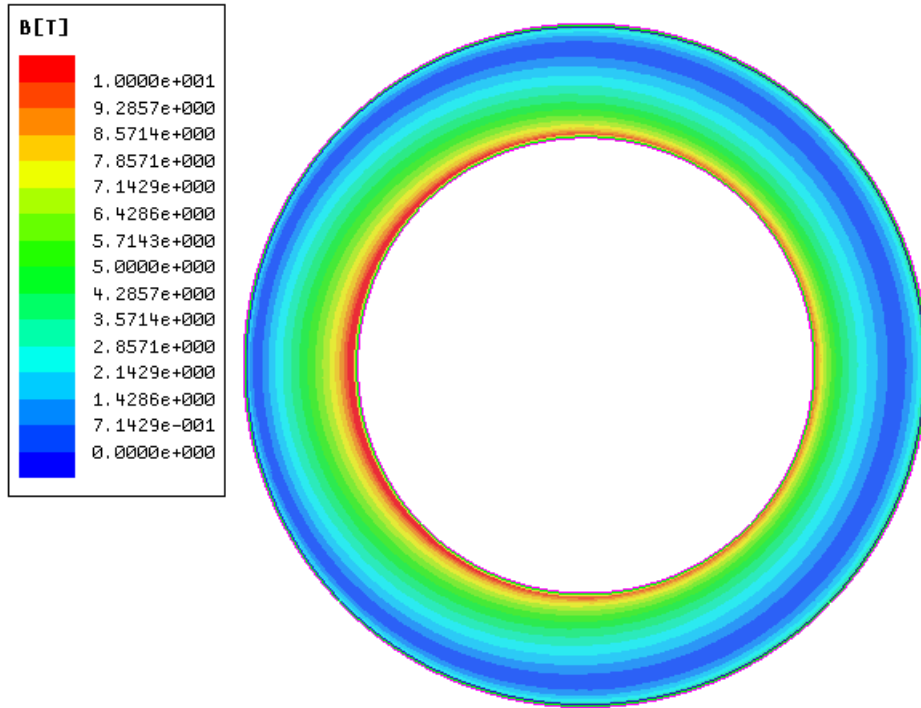


그림 3.12 모듈 중앙 단면의 자속밀도 분포

Fig. 3.12 Flux density distribution on the cross-section of the module

단 이 그림들은 자속밀도의 절대값으로 나타낸 결과들이며, 각 위치의 선재들에 가해지는 수평, 수직 자속밀도는 xyz 좌표계의 자속밀도 벡터로부터 계산하여야 한다. 그림 3.13 와 같은 위치에 있는 모듈의 선재에 가해지는 수평, 수직 자속밀도는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + (B_y \sin \theta - B_z \cos \theta)^2} \quad (3.8)$$

$$B_n = |B_y \cos \theta - B_z \sin \theta| \quad (3.9)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{z}{y-r} \quad (3.10)$$

여기서 x, y, z 는 선재의 좌표, B_x, B_y, B_z 는 각각 선재에 가해지는 자속밀도의 x, y, z 성분을 나타낸다. 이렇게 얻어진 수평자장과 수직자장을 나타내면 각각 그림 3.14, 3.15 와 같다.

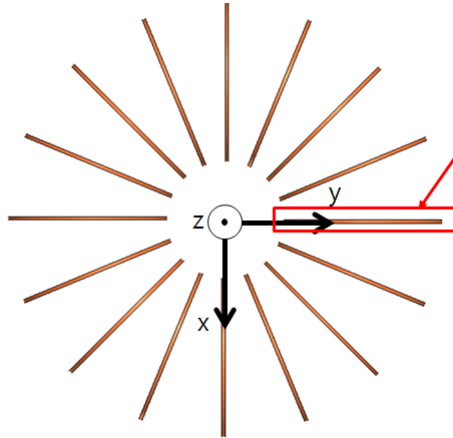


그림 3.13 선재에 가해지는 수평, 수직 자속밀도 해석대상 모듈의 위치

Fig. 3.13 The location of the module which is the target of parallel, perpendicular flux density calculation

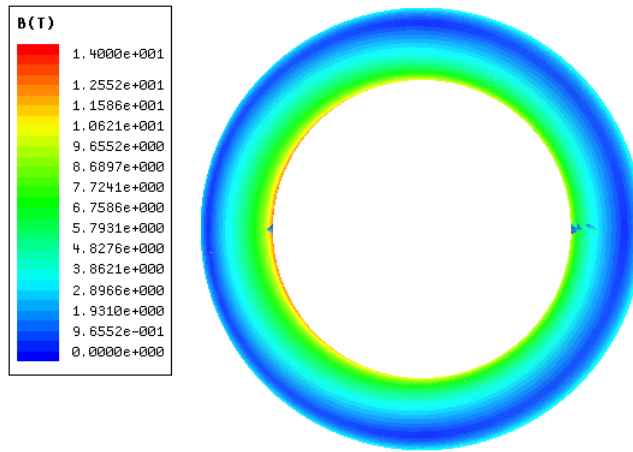


그림 3.14 모듈 중앙 단면에서 선재가 받는 수평 자속밀도 분포

Fig. 3.14 The parallel flux density distribution on the middle cross section of the module

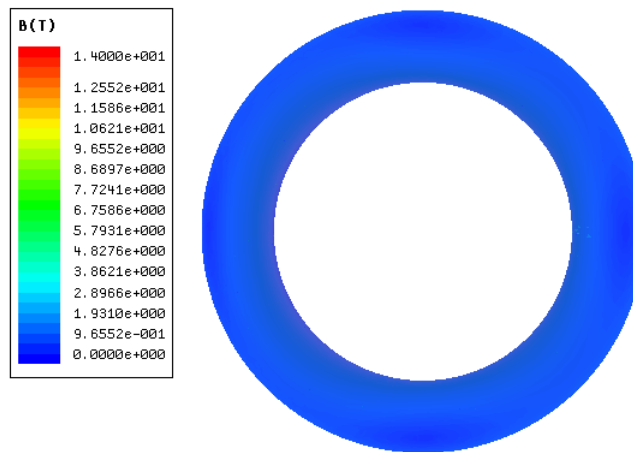


그림 3.15 모듈 중앙 단면에서 선재가 받는 수직 자속밀도 분포

Fig. 3.15 The perpendicular flux density distribution on the middle cross section of the module

그림 3.14 를 통해 최대 수평자장은 토로이드 중심에 가장 가까운 내벽에서 나타난다는 것을 알 수 있다. 이를 확인하기 위해 토로이드 중심축에서 모듈 중심을 가로지르는 경로를 따라 자속밀도 분포를 그려보면 그림 3.16 과 같다. 두께 방향에서 좀더 정확한 위치 판단을 위하여 모듈의 각 단면에 대한 수평자장 분포를 그림 3.17 에 나타내었고, 각 단면에서도 같은 위치에서 최대 수평자장이 나타내는 것을 확인할 수 있다.

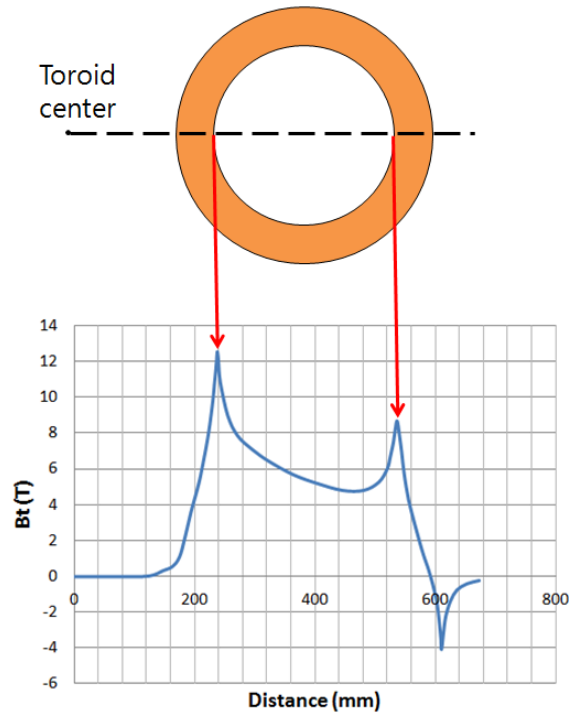


그림 3.16 토로이드 중심에서 모듈 끝단까지의 수평 자속밀도 분포
 Fig. 3.16 The parallel flux density distribution on the line which
 crosses the center of module

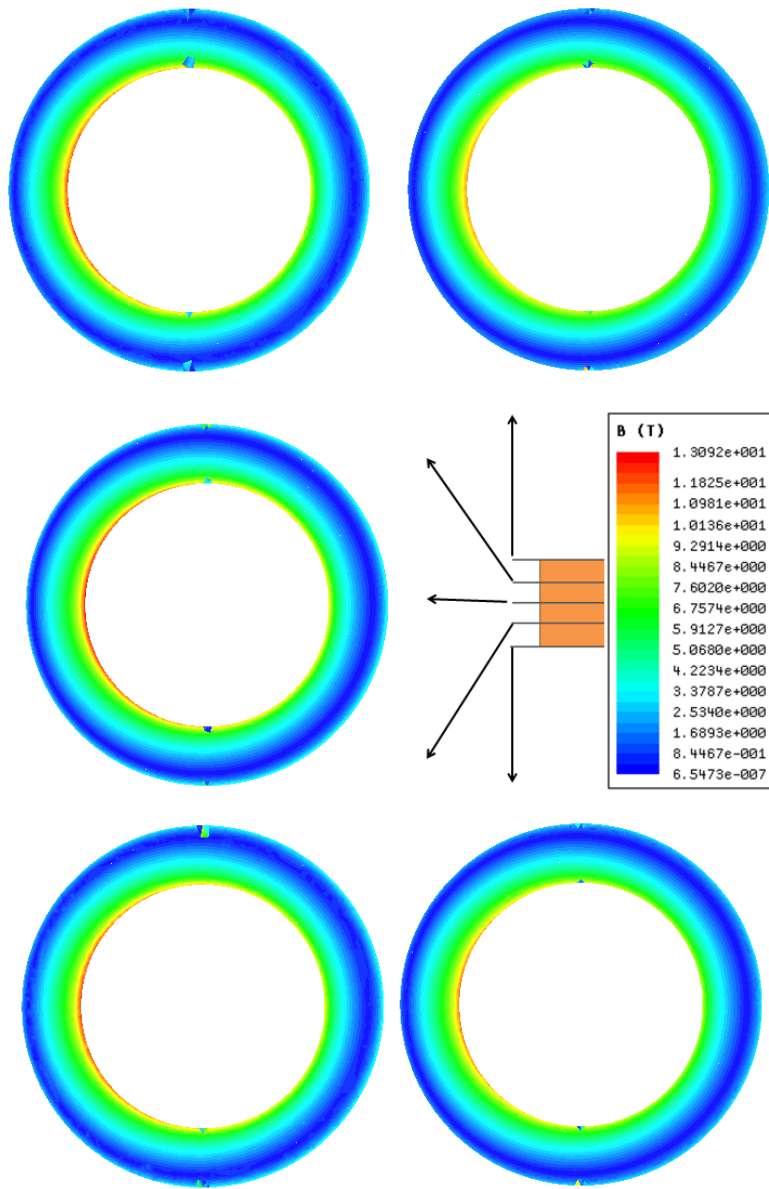


그림 3.17 모듈 각 단면에서의 수평자장 분포

Fig. 3.17 The parallel flux density on each cross section of module

그림 3.15 에서는 알 수 있듯이 모듈의 중앙 단면에서는 수직자장이 거의 나타나지 않는다. 모듈이 깊이 방향으로 수직자장이 어떠한 변화추세를 갖는지 확인하기 위해 모듈의 각 단면에 대해 수직자장 분포를 계산하였고, 그 결과는 그림 3.18 과 같다. 공통적인 추세로 모듈의 안쪽과 바깥쪽 부분의 중간 정도에서 큰 수직자장이 나타나고 있고, 수평자장과는 반대로 모듈 표면에 가까워질수록 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 모듈의 표면을 가로지르는 경로를 따라 수직 자속밀도 분포를 그려보면 그림 3.19 와 같으며, 크기를 비교해 보면 바깥쪽에서 안쪽보다 더 큰 크기를 보이는 것을 알 수 있다.

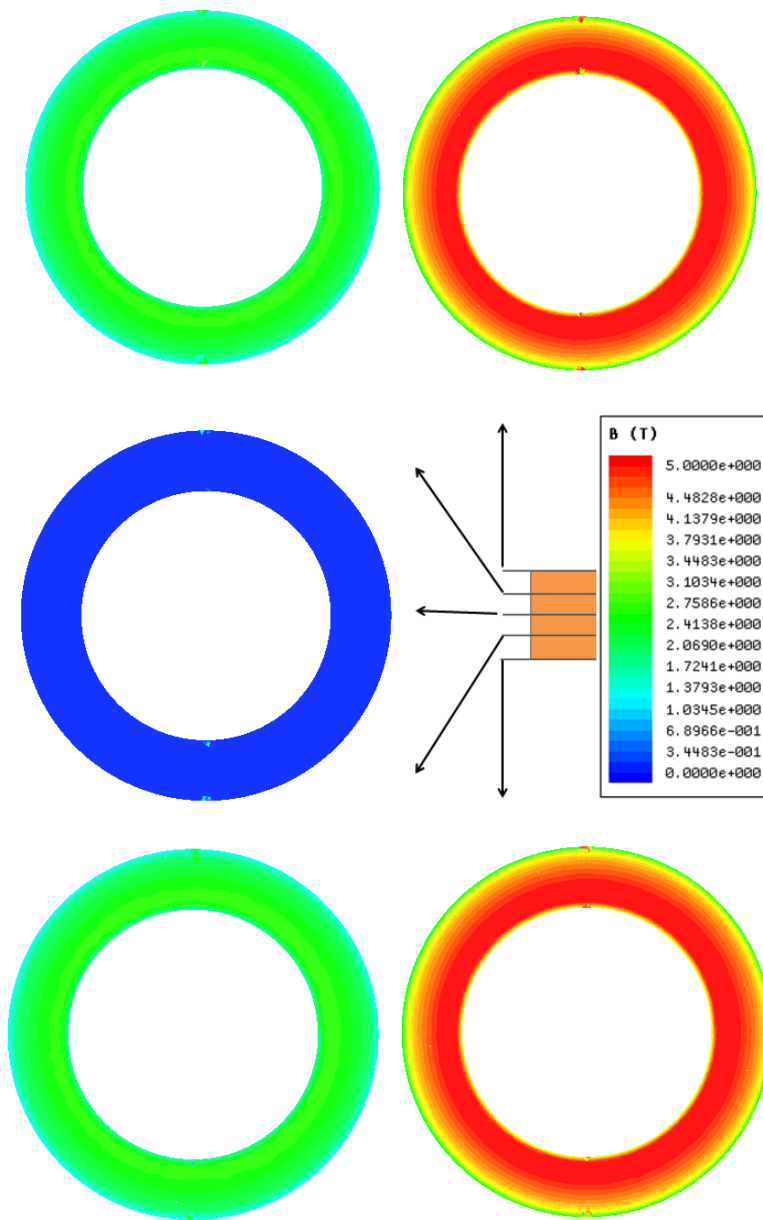


그림 3.18 각 단면에서의 수직자장 분포

Fig. 3.18 The perpendicular flux density on each cross section of module

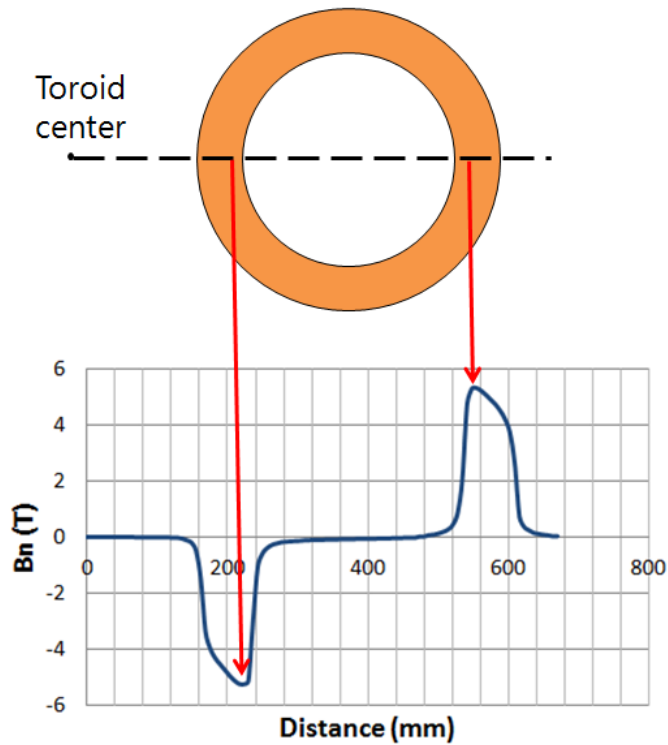


그림 3.19 토로이드 중심에서 모듈 끝단까지의 수직 자속밀도 분포

Fig. 3.19 The perpendicular flux density distribution on the line
which crosses the center of module

다양한 형상의 모델들에 대하여 위와 같은 방식으로 최대 수평, 수직 자장 위치를 찾아보았을 때 모두 같은 결과를 보였다. 따라서 데이터 테이블 구축을 위한 수평, 수직 자장 데이터 수집 위치를 그림 3.20 과 같이 정하였다.

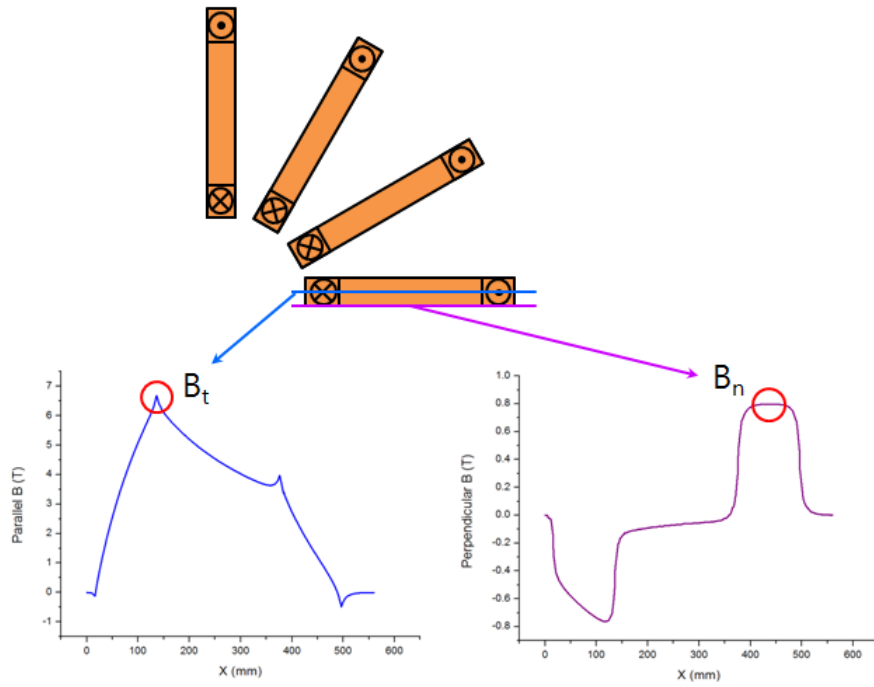


그림 3.20 최대 수평, 수직 자장 데이터 수집 위치

Fig. 3.20 The location of the maximum parallel, perpendicular flux density data

3.7.2 전류에 따른 자장 변화

철심의 포화를 고려해야 하는 일반 전기기기와는 달리 SMES 는 공심형 구조를 가지기 때문에 전류가 증가함에 따라 선형적으로 자속밀도가 증가한다. 그림 3.21~3.23 은 같은 형상을 가지는 토로이드형 SMES 코일에서 전류크기만을 변화시키면서 중심, 수평 및 수직 자장의 크기를 구한 결과이다. 중심 자장은 식 (3.6)으로부터도 알 수 있듯이 선형적으로 증가하며, 수평, 수직 자장 또한 그렇다는 것을 알 수 있다.

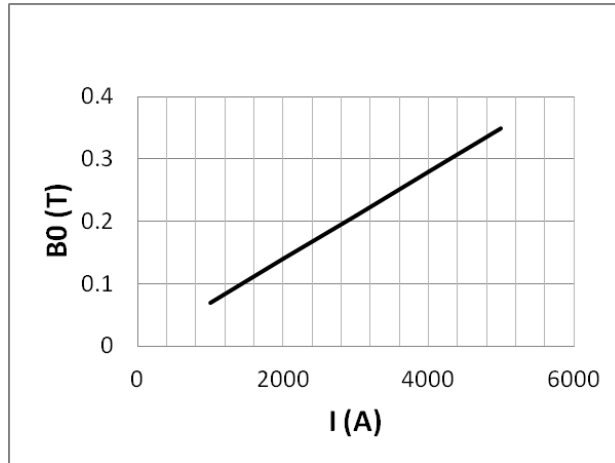


그림 3.21 전류크기에 따른 중심자장

Fig. 3.21 The variation of center flux density with different current

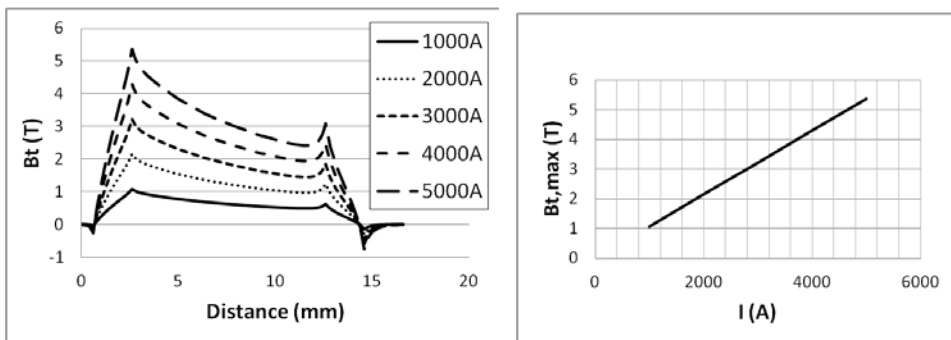


그림 3.22 전류크기에 따른 수평자장

Fig. 3.22 The variation of parallel flux density with different current

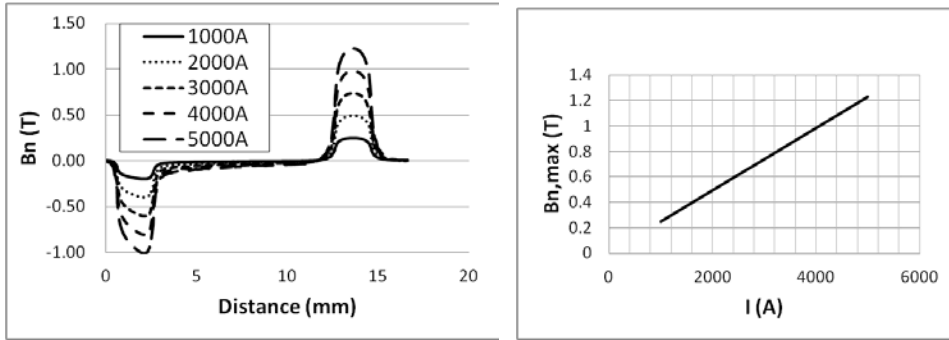


그림 3.23 전류크기에 따른 수직자장

Fig. 3.23 The variation of perpendicular flux density with different current

따라서 특정한 전류 I_{ref} 에 대해 구한 중심자장을 $B_{0,ref}$, 수평 자장을 $B_{t,ref}$ 라고 하고, 실제 모델에서 흐르는 전류를 I_{model} , 중심자장을 $B_{0,model}$, 수평 자장을 $B_{t,model}$ 이라고 한다면 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$\frac{B_{t,ref}}{B_{0,ref}} = \frac{B_{t,model} \frac{I_{model}}{I_{ref}}}{B_{0,model} \frac{I_{model}}{I_{ref}}} = \frac{B_{t,model}}{B_{0,model}} \quad (3.11)$$

위 식에서 알 수 있듯이 같은 형상을 갖는 모델에 대해서는 전류의 크기가 변하더라도 최대 수평자속밀도와 중심자속밀도의 비는 변하지 않으며, 이는 최대 수직자속밀도에 대해서도 성립한다. 따라서 데이터 테이블

의 출력 변수를 B_t 와 B_n 이 아닌, B_t/B_0 와 B_n/B_0 로 설정한다면, 입력 변수에서 I 를 제외시키고, 데이터 테이블은 임의의 전류에서 구축하면 된다. B_t/B_0 와 B_n/B_0 를 안다면 B_0 값은 이미 알고 있는 값이므로, 이로부터 B_t 와 B_n 을 구할 수 있다.

3.7.3 최대 수평, 수직자장에 영향을 미치는 변수

I 가 제외된 후에 남아 있는 설계변수는 N_p , r , a , N 이다. 이 변수들이 어떻게 최대 수평 및 수직자장에 영향을 미치는 지 관찰 및 분석을 통해 최종적인 테이블 입력 변수를 지정한다.

모든 스케일의 SMES 설계에 사용될 수 있는 데이터 테이블을 만들기 위해서는 입력변수는 r , a 와 같은 절대량이 아닌 변수들의 비율 값이 되어야 한다. 입력 변수의 선정을 위한 최대 수평 및 수직자장 변화 추세 분석은 이러한 조건을 고려하여 진행되었다.

우선 다음과 같은 몇 가지 비율값에 대해 고려해 본다.

$$\alpha = \frac{a}{r} \quad (3.11)$$

$$\beta = \frac{Nh_{wire}}{r} = \frac{b}{r} \quad (3.12)$$

α 와 β 는 스케일에 상관없이 SMES 의 형상을 묘사할 수 있는 매개변수이다. α 와 β 가 어떻게 B_t/B_0 와 B_n/B_0 를 변화시키는지 분석하기 위해

일련의 해석을 수행하였다. 우선 그림 3.24 는 α 와 β 가 매개변수로써 가능성이 있는지를 살펴보기 위해 α 와 β 를 고정시키고, N_p 와 r 을 변화시키면서 해석한 결과이다. N_p 가 12 인 모델과 24, 36 인 모델들의 해석시 작점이 다른 것은 모듈 간의 간격 때문이다.

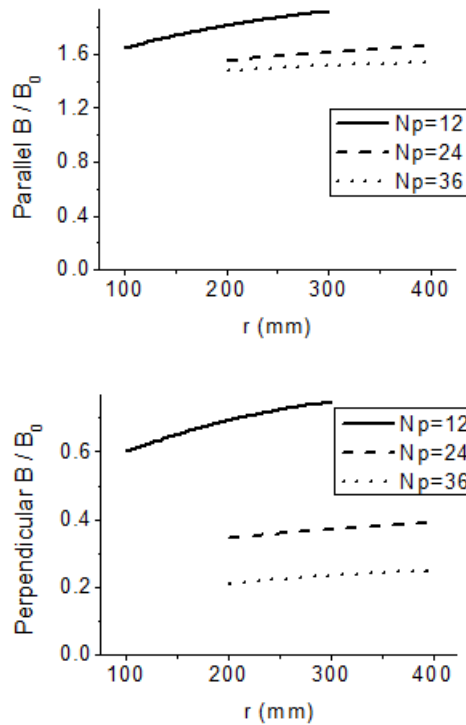


그림 3.24 α 와 β 가 고정되었을 때, N_p 와 r 에 따른 자장 해석 결과

Fig. 3.24 Analysis result of flux density when α 와 β is fixed.

그림 3.24 에서 알 수 있듯이 N_p 가 충분히 커 모듈 사이의 간격이 좁은 경우에는 r 이 바뀌어 전체적인 크기가 변하여도 B_t/B_0 와 B_n/B_0 의 값이 크게 변하지 않았다. 이러한 특성을 이용하여 N_p , α 와 β 를 데이터 테이블의 입력변수로 사용한 연구를 진행하여 긍정적인 결과를 얻은 바 있다.

하지만 N_p 가 줄어들 경우, 이러한 경향이 급격히 사라지게 되며, 입력 변수에 여전히 N_p 라는 절대값이 포함되어 데이터 테이블의 범용성이 부족할 수 있다. 또한 수직 자장의 경우 수평 자장보다 변화가 급격하여 r 이 매우 큰 값으로 증가할 경우 데이터 테이블에 오차가 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 다른 매개변수에 대한 고찰을 계속 하였다.

우선 데이터 테이블의 개선을 위해 α 와 β 가 각각 어떻게 수평과 수직 자장에 영향을 주는지 살펴보았다. 그림 3.25 는 다른 변수들이 고정되고, α 나 β 만이 바뀔 때 수평, 수직 자속밀도가 어떻게 바뀌는지 나타내고 있다. 전체적인 추세를 살펴보면, α 가 증가할 경우 B_t/B_0 와 B_n/B_0 값이 모두 증가하며, β 가 증가할 경우에는 반대로 B_t/B_0 와 B_n/B_0 값이 모두 감소한다. 또한 B_t/B_0 의 경우 β 보다는 α 에 더 민감하게 변화하는 반면, B_n/B_0 는 β 값에 대해 더 민감하다.

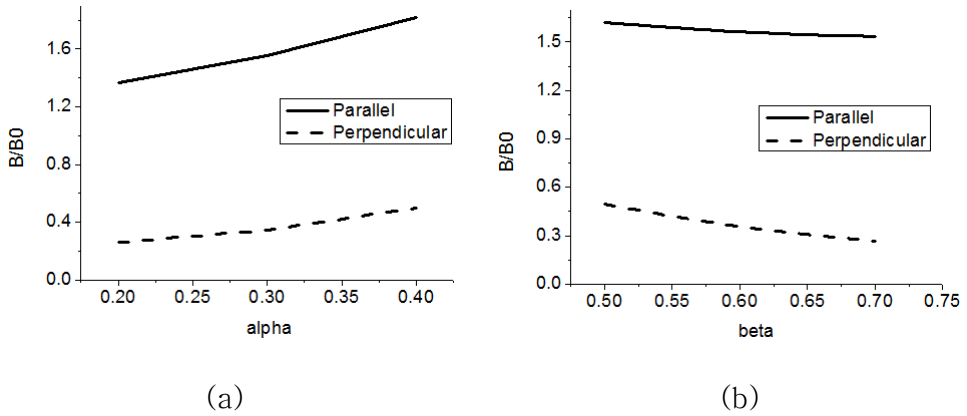


그림 3.25 수평, 수직 자장에 (a) α 나 (b) β 가 미치는 영향

Fig. 3.25 The influence of α and β on parallel and perpendicular flux density

r 이 고정되어 있을 때, α 가 증가한다는 것은 즉 a 가 증가한다는 것을 뜻하는데, 이는 식 (3.4)와 (3.6)에 따라 B_0 가 증가하는 것을 말한다. 하지만 그와 동시에 그림 3.16에 나타나는 것과 같은 내벽과 외벽 사이의 최대 수평자장 차이 또한 커지면서 B/B_0 가 증가하는 결과를 보이게 된다.

선재에 가해지는 수직자장의 증가 혹은 감소 요인을 살펴보기 위해서 모듈 안쪽과 바깥쪽의 자속밀도 벡터(그림 3.26)를 구하였다.

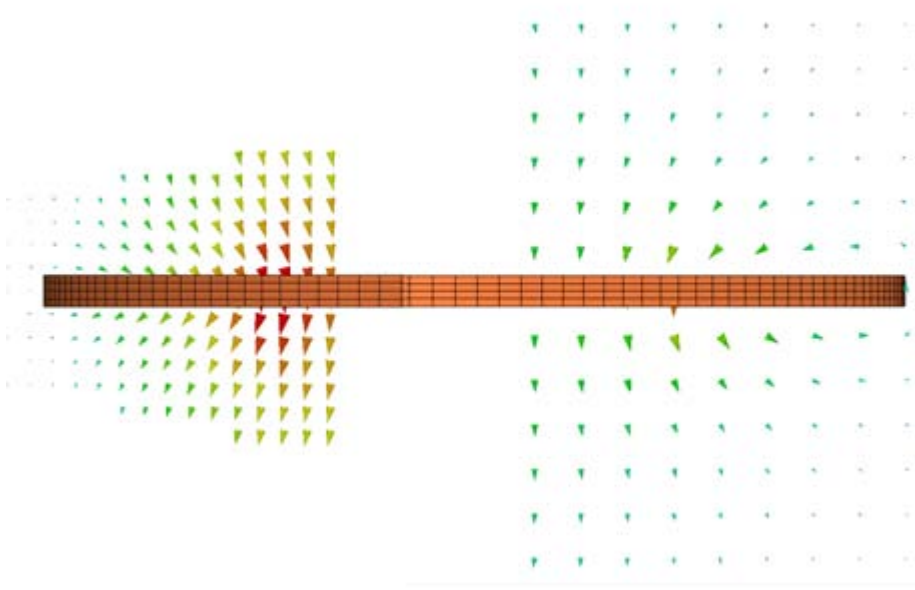


그림 3.26 모듈 안쪽과 바깥쪽의 자속밀도 벡터

Fig. 3.26 The flux density vector near the inner, outer part of module

선재에 가해지는 수직자장은 두 가지 요인에 의해 결정된다고 할 수 있다. 원주방향에서 벗어나 누설되는 자속이 첫 번째 요인이며, 두 번째로는 코일의 내벽이 x 방향으로 원호가 아닌 직선 형태이기 때문에 자속과 선재 사이에 생기는 각도가 원인이 된다. 따라서 수직자장은 그림 3.27의 p_{in} , p_{out} , w , h 와 비례관계를 가질 것으로 추측할 수 있고, 이들을 묶어줄 매개변수 ν 와 ω 를 제시하였다.

$$\nu = \frac{P_{in}}{q} \quad (3.13)$$

$$\omega = \frac{P_{out}}{q} \quad (3.14)$$

여기서 q 는 그림 3.27 에서 나타나듯이 모듈 표면에 수직 자장이 최대가 되는 점을 지나는 자속 경로를 반영하면서 w 와 h 의 길이 변동을 반영할 수 있다. h 가 0 일 경우, r 과 a 가 정해지면 p_{in} 과 p_{out} 은 상관관계를 갖게 되어 ν 와 ω 를 하나의 변수로 통합할 수 있다. 하지만 h 가 0 이 아닐 경우에는 r 과 a 가 정해지더라도 h 에 따라 p_{in} 과 p_{out} 의 비율이 달라지기 때문에 ν 와 ω 의 통합은 불가능하다.

또한 ν 와 ω 을 이용함으로써 불연속 변수인 N_p 를 제외할 수 있다는 장점이 있다.

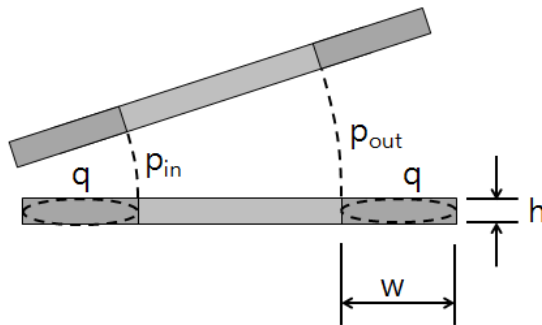


그림 3.27 수직자장의 크기에 영향을 주는 형상 요소

Fig. 3.27 The variables which affect the perpendicular flux density

ν 와 ω 가 매개변수로서 타당한 지 알아보기 위해 α , ν , ω 를 고정시키고 r 을 변화시키면서 해석하였고, 그 결과는 그림 3.28 와 같다. r 의 변화에 따라 B_t/B_0 , B_n/B_0 의 값이 거의 변하지 않는 것을 볼 수 있고, 따라서 데이터 테이블의 입력변수로서 적합하다는 것을 알 수 있다.

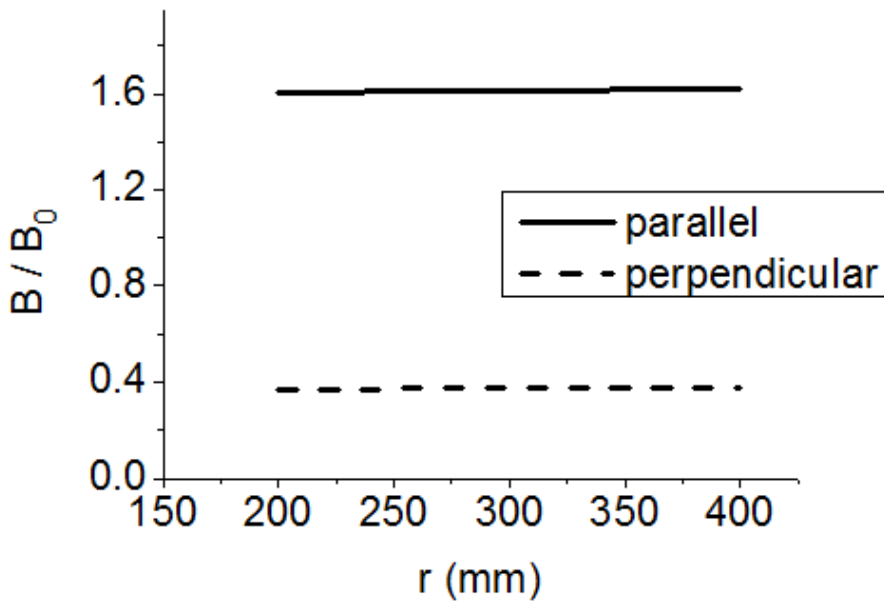


그림 3.28 ν 와 ω 가 일정할 때의 r 에 따른 자속밀도

Fig. 3.28 The variations of flux density with varying r and fixed ν and ω

3.7.4 데이터 테이블의 구성

위와 같은 과정을 거쳐 최종적으로 선택된 데이터 테이블 입출력 변수를 표 3.3 에 정리하였다. 입력 변수의 범위는 극단적인 형상을 제외하면 범용성을 가질 수 있도록 넓게 설정하였다. 각 입력 변수는 범위 내에 20~50 개 정도의 값을 가지고 있고, 데이터 테이블의 구축에는 약 25 일 정도가 소요되었다. 하지만 이 경우에는 데이터 테이블의 유효성을 보기 위해 조밀하게 데이터를 구하였기 때문이고, 입력 변수에 따른 출력 변수의 변화 추세는 앞서서도 보았듯이 연속성을 보이기 때문에 더 적은 데이터로도 유효한 테이블을 구축할 수 있을 것으로 생각된다.

이렇게 만들어진 데이터 테이블은 kJ 단위의 저장에너지를 갖는 소형 토로이드형 SMES 로부터 GJ 단위의 대형 토로이드형 SMES 까지 모두 적용이 가능하다. 하지만, 데이터 테이블의 한계점 또한 존재하는데, h 가 w 에 비해 지나치게 클 경우, 즉 모듈이 원통형에 가까워질 경우, 데이터 테이블의 정확도가 떨어지게 된다. φ , ω 는 자속 경로 길이를 근거로 선정되었는데, h 가 w 에 비해 지나치게 클 경우, 자속 경로가 다른 양상을 보이기 때문이다. 단, 일반적인 토로이드형 SMES 의 경우 h 는 선재폭과 같은 값을 가지거나, 두 층의 모듈을 겹쳐 선재 폭의 2 배 남짓한 크기를 가지는 것이 보통이므로 위와 같은 상황은 보통 일어나지 않는다.

표 3.3 데이터 테이블의 입출력 변수

Table 3.3 Input, output variables of data table

	입력 변수			출력 변수	
변수 기호	α	ν	ω	B_t/B_0	B_r/B_0
데이터 범위	0.2~0.8	0.1~4.0	0.1~10.0	—	—

3.8 응력 계산

SMES 는 높은 자장과 전류밀도로 동작하기 때문에 큰 로렌츠 힘이 발생될 가능성이 높다. 이로 인하여 발생하는 응력이 3.1.2 절에서 언급한 초전도 선재의 최대 인장응력을 넘어서는 경우, 코일의 손상이 일어난다. 따라서 설계기법에 따라 도출된 최적화 모델에 대하여 최종적으로 응력을 해석하여 사용 가능한 모델인지 판단하여야 한다.

코일이 받는 응력을 해석하기 위해서는 우선 코일에서 발생하는 로렌츠 힘을 구하여야 한다. 로렌츠 힘의 분포는 유한요소해석을 통해 구해진 자속밀도 분포와 전류밀도 분포를 곱하여 계산될 수 있고, 이를 체적으로 적분하면 모듈이 받는 전체 힘을 구할 수 있다.

이러한 로렌츠힘에 의한 응력은 아래와 같은 지배 방정식을 이용해 수치해석을 통해 구할 수 있다.

$$r \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + (\beta_1 E_h + 1 - \alpha_1 E_h) \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{E_h}{E_r} \frac{u}{r} = -E_h r \Delta J B + (X_1 - X_2) E_h \quad (3.15)$$

여기서 u 는 반경 방향의 변위량, E_r 과 E_h 는 각각 코일의 반경방향, 원주방향 영률, J 는 전류밀도, B 는 자속밀도이며, α_1 , β_1 , X_1 , X_2 는 코일의 영률, 푸아송 비, 변위량, 응력 등으로 이루어진 함수이다. 이들에 대한 자세한 설명은 부록 A 에 실었다. 이렇게 구해진 응력의 최대값이 선재의 최대 인장응력보다 클 경우, 해당 설계안은 버려지게 된다.

제 4 장 토로이드형 SMES 최적설계

4장에서는 3장에서 제안된 설계기법을 이용하여 토로이드형 SMES의 최적화 설계를 진행한다. 설계결과의 비교를 위하여 같은 조건에서 유한 요소법을 이용한 설계를 병행하여 진행하며, 설계 시간, 최적화 결과 등을 비교하여 제안된 설계기법의 유용성을 검증하고자 한다.

4.1 설계변수, 목적함수 및 제한조건

그림 3.6의 토로이드형 SMES 형상 변수 중, 모듈의 두께는 선재의 폭에 의해 결정되므로 설계변수에서 제외된다. b 는 다음과 같은 식으로 나타나고,

$$b = h_{wire}N \quad (4.1)$$

h_{wire} 는 정해져 있으므로 N 으로 b 를 대체할 수 있다. 따라서 최종적으로 남게 되는 형상설계변수는 N_p , r , a , N 이다. 여기에 추가적으로 I 가 설계변수에 더해지게 된다.

앞 장에서도 언급했듯이 SMES 최적설계의 목적은 모델에 사용되는 전체 선재량의 최소화이다. 전체 선재량은 형상 설계변수로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$l_{total} = N_p \cdot N \cdot 2\pi \cdot \frac{a + h_{wire}N}{2} = N_p N(a + h_{wire}N)\pi \quad (4.2)$$

기본적인 제한 조건은 SMES의 저장에너지, load factor, 선재의 임계 온도, 임계전류, 임계자속밀도, 모듈 간 최소 거리, 모듈의 최소 내반경, 최대 응력, 손실이 있다. 이중 임계온도를 냉각 시스템 선정에 의해 결정하게 되면, 임계전류밀도와 임계자속밀도는 선재 특성에 따라 상호관계에 의해 결정되므로, 최종적으로는 저장에너지와 선재의 임계전류, 모듈 간 최소 거리, 최소 곡률 반경, 최대 응력, 손실이 제한 조건으로 남게 되며, 냉각조의 크기제한으로 인해 토로이드의 최대직경이 제한 조건으로 추가될 수 있다.

4.2 최적 설계 순서도

본 논문에서는, 최적설계를 위하여 제안된 설계기법과 유한요소해석을 사용한 설계를 각각 진화전략 알고리즘 (ES)과 결합하였다. 진화 전략 알고리즘 (ES)을 선택한 이유와 알고리즘에 대한 설명은 부록 A에 첨부하였다.

4.2.1 제안된 설계기법을 이용한 최적 설계 순서도

제안된 설계기법과 ES를 결합한 최적 설계 순서도는 그림 4.1과 같으며, 단계별로 다음과 같이 진행된다.

1단계: 저장 에너지, load factor, 모듈 간 최소거리 등의 제한조건을 설정한다.

2단계: 설계에 사용할 초전도 선재를 선택하고, 냉각방식과 온도를 결정한다. 선재의 특성 그래프로부터 해당 온도에서의 $B-I_c$ 그래프를 구하여 이를 저장한다. 또한 선재의 기계적 강도를 제한조건으로서 저장한다.

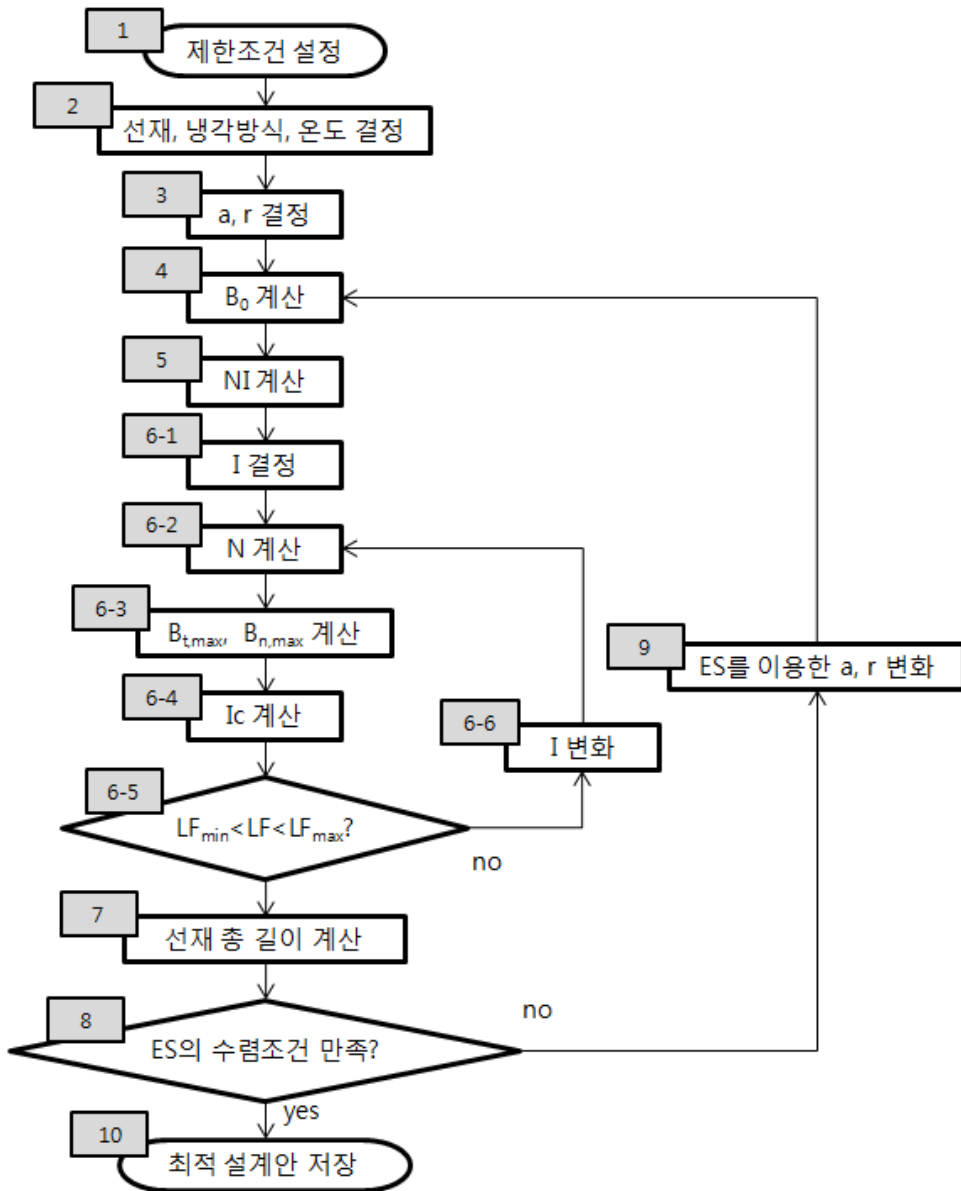


그림 4.1 제안된 설계기법을 이용한 최적 설계 순서도

Fig. 4.1 The optimization flow chart of proposed design method

3단계: 설계변수인 a , r 의 초기값을 결정하여 입력한다. 구조 상 a 의 값은 다음과 같은 설계변수 선택 범위가 존재한다. 여기서 $a_{coil,min}$ 은 선재의 최소 곡률반경이다.

$$r > a \geq a_{coil,min} \quad (5.1)$$

4단계: 식 (3.4)를 이용하여 저장 에너지를 만족시키기 위한 중심자장 B_0 를 계산한다.

5단계: 식 (3.6)으로부터 NI 를 계산한다.

6단계: N 과 I 를 결정해주는 단계로서 다음과 같이 세부적으로 나누어진 다.

6-1단계: 초기 전류 값을 결정한다.

6-2단계: 3단계에서 구한 NI 값으로부터 N 를 계산한다.

6-3단계: 6-2단계에서 형상이 확정된 모델에 대해 표 3.3과 같은 데이터 테이블로부터 선재에 가해지는 최대 수평, 수직자속밀도 $B_{t,max}$, $B_{n,max}$ 를 구한다.

6-4단계: 2단계에서 저장된 선재의 $B-I_c$ 그래프로부터 $B_{t,max}$, $B_{n,max}$ 시의 I_c 값을 각각 구한 후 비교하여 작은 값을 남긴다.

6-5단계: 모델의 load factor가 1단계에서 설정한 load factor 범위 내에 있는지 확인하여 만족되면 7단계로 넘어가고 그렇지 않다면 6-6단계를 통해서 조건이 만족될 때까지 6-2에서 6-5단계를 반복한다.

6-6단계: I 를 변화시킨다. 6-5단계에서 load factor가 LF_{min} 보다 작았다면 I 를 증가시키고, LF_{max} 보다 컸다면 I 를 감소시키는 방향으로 변화시킨다.

7단계: 식 (4.2)를 통해 목적함수인 선재 총 길이를 계산한다.

8단계: 구해진 목적함수가 ES의 수렴조건을 만족할 경우, 10단계로 넘어가며, 그렇지 않을 경우, 9단계를 통해 4~8단계를 반복한다.

9단계: ES 알고리즘의 선택 및 변이에 의해 새로운 a , r 을 결정한다.

8단계: 최적 설계안을 저장하고, 최적설계를 종료한다.

4.2.2 유한요소해석을 이용한 최적 설계 순서도

유한요소해석을 이용한 최적 설계는 그림 4.2의 순서도를 따라 진행되며, 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다.

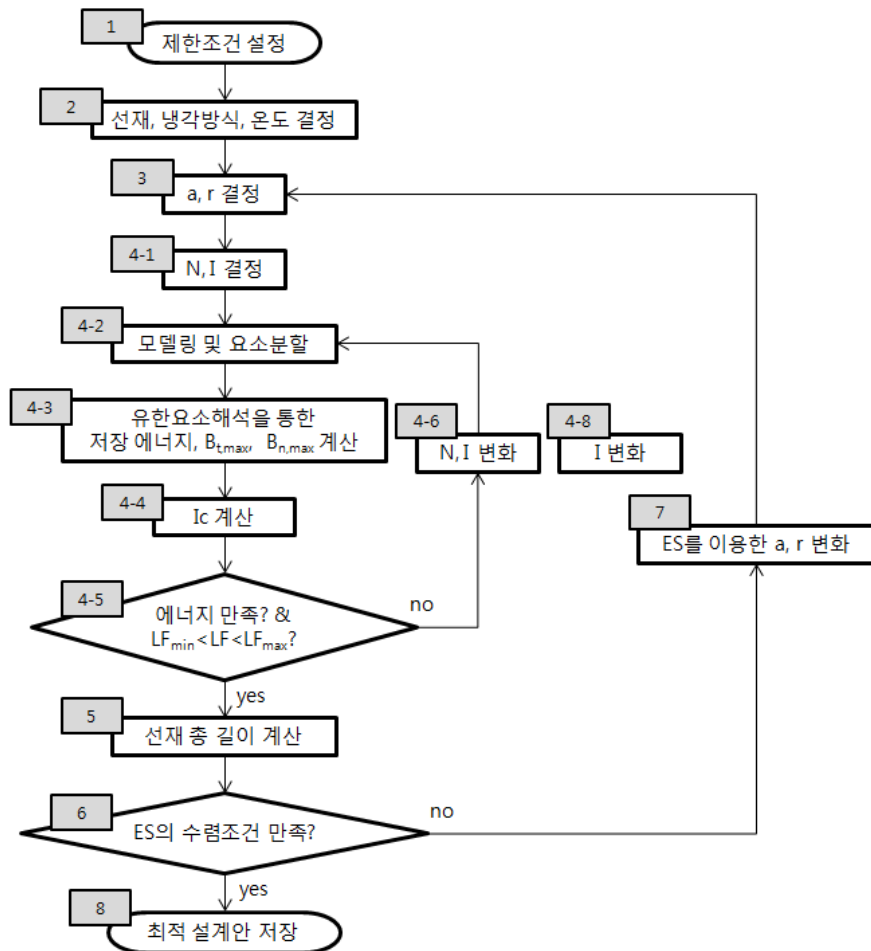


그림 4.2 유한요소해석을 이용한 최적 설계 순서도

Fig. 4.2 The optimization flow chart using the finite element analysis

1단계: 저장 에너지, load factor, 모듈 간 최소거리 등의 제한조건을 설정한다.

2단계: 설계에 사용할 초전도 선재를 선택하고, 냉각방식과 온도를 결정한다. 선재의 특성 그래프로부터 해당 온도에서의 $B-I_c$ 그래프를 구하여 이를 저장한다. 또한 선재의 기계적 강도를 제한조건으로써 저장한다.

3단계: a, r 의 초기값 결정한다.

4단계는 주어진 a, r 에 대하여 저장에너지와 load factor 조건을 만족시키는 N 과 I 를 구하기 위한 단계이고 세부적으로 다음과 같이 나뉘어진다.

4-1단계: 초기 N, I 값을 결정한다. 선재 최소화를 위해서는 최대한 많은 전류를 흘리는 것을 목표로 해야 하기 때문에, 다음 단계들을 통해 서서히 전류를 줄여주는 방식으로 설계가 진행된다. 따라서 초기 I 값은 예상되는 자속밀도 하에서의 I_c 값보다 더 큰 값으로 설정하는 것이 좋다. N 은 다음 단계들을 통해 저장 에너지 계산 결과에 따라 조절하기 때문에 임의의 값으로 설정하여도 되지만, 수렴 속도를 증가시키기 위해서 합리적인 값을 시작점으로 하는 것이 좋다. 본 논문에서는 이전 루프에서 결정된 모델의 N 을 시작점으로 설정하고 있다.

4-2단계: 결정된 형상함수와 전류를 이용하여 모델링을 진행하고, 요소분할을 한다. 그림 3.7과 같은 모듈 하나로 이루어진 3D 주기모델로 모델링되며, 형상에 따라 4만개에서 10만개 사이의 요소로 나뉘어 진다.

4-3단계: 3D 유한요소해석을 통해 저장 에너지와 $B_{t,max}$, $B_{n,max}$ 를 계산한다.

4-4단계: 2단계에서 저장된 선재의 $B-I_c$ 그래프로부터 $B_{t,max}$, $B_{n,max}$ 시의 I_c 값을 각각 구한 후 비교하여 작은 값을 남긴다.

4-5단계: 계산된 저장 에너지와 load factor를 확인하여 목표 범위 내에 들어가면 5단계로 넘어가고, 그렇지 않을 경우 4-6단계를 통해 4-2~4-5단계를 반복한다.

4-6단계: 계산된 저장 에너지의 크기에 따라 I 를 변화시킨다. LF_{max} 를 초과했는데도 불구하고 에너지를 만족시키지 못 하였다면, N 을 변화시킨다.

5단계: 식 (4.2)를 통해 목적함수인 선재 총 길이를 계산한다.

6단계: 구해진 목적함수가 ES의 수렴조건을 만족할 경우, 8단계로 넘

어가며, 그렇지 않을 경우, 7단계를 통해 3~6단계를 반복한다.

7단계: ES 알고리즘의 선택 및 변이에 의해 새로운 a, r 을 결정한다.

8단계: 최적 설계안을 저장하고, 최적설계를 종료한다.

4.3 최적 설계 결과

제안된 최적 설계 기법의 검증을 통해 각기 다른 저장 에너지를 갖는 토로이드형 SMES에 대한 최적설계를 각각 그림 4.1과 그림 4.2의 최적 설계 순서도를 이용하여 진행하였다. 최적 설계 대상은 500kJ, 4MJ급 토로이드형 SMES이고, 설계의 다양성을 위하여 500kJ은 두 가지 선재에 대해서 설계하였다. 저장에너지에 5%의 설계 마진을 두었으며, 0.68~0.70 사이의 load factor를 갖도록 설계하였다. 공통적으로 전도방식 냉각을 사용하여 20K의 온도를 유지한다는 조건 하에서 설계를 진행하였다.

설명의 간략화를 위해 본 절에서는 제안된 설계기법을 이용한 최적 설계안을 모델1, 유한요소해석을 이용한 최적 설계안을 모델2로 명명한다.

4.3.1 BSCCO 선재를 이용한 500kJ 토로이드형 SMES 최적설계

500kJ급 토로이드형 SMES 코일 설계에는 BSCCO 선재를 사용하였으며, 선재의 기본 특성은 표 4.1과 같다. 온도 및 자장에 따른 임계전류 특성 곡선은 그림 4.3, 4.4에 나타내었다

중심에서 모듈까지의 거리, 즉, $r-b$ 의 값은 제작 시 지지구조물 설치 공간과 작업공간 확보를 위하여 100mm 이상이 되도록 하였으며, 각 모듈 사이의 간격은 5mm 이상이 되도록 하였고, 토로이드의 최대 크기에는 제한을 주지 않았다. 냉각온도는 선재의 특성을 고려할 때 충분한 임계전류크기를 확보할 수 있는 20K로 정하였다.

표 4.1 DI-BSCCO Type H 기본 특성 (스미토모 제공)

Table 4.1 Basic characteristic of DI-BSCCO Type H

Average Width	4.3 ± 0.3 mm
Average Thickness	0.23 ± 0.3 mm
Maximum length	1500 m
I_c (77K, Self Field)	200A
Critical Tensile Strength* (RT)	80 N
Critical Tensile Strength* (77K)	130 MPa
Critical Tensile Strain* (77K)	0.2 %
Critical Double Bend Diameter* (RT)	70 mm

* 95% I_c Retention

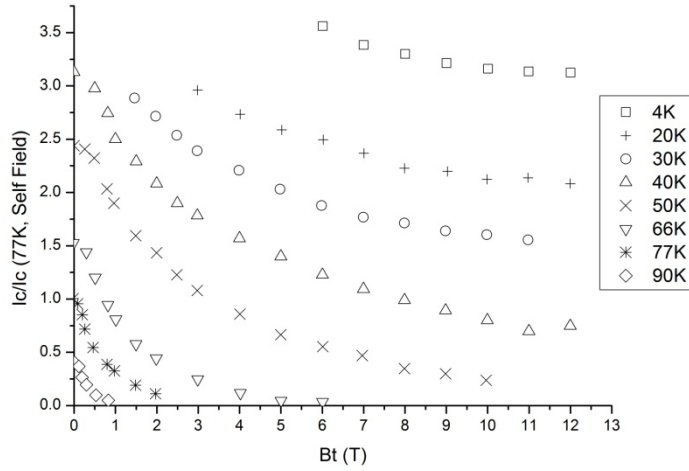


그림 4.3 DI-BSCCO의 수평 자장에 따른 임계전류

Fig. 4.3 The B_t - I_c characteristic of DI-BSCCO

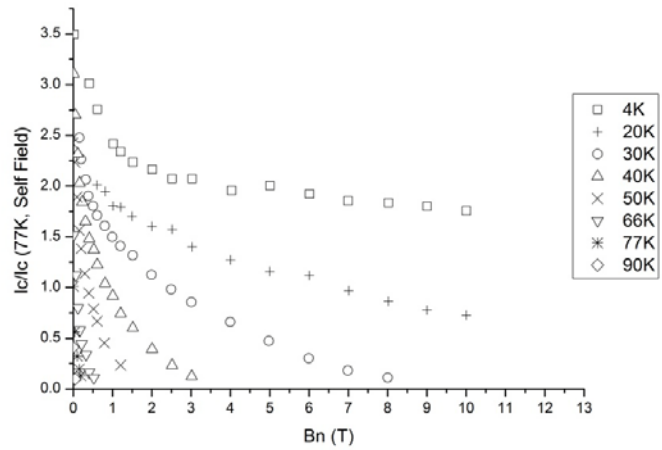
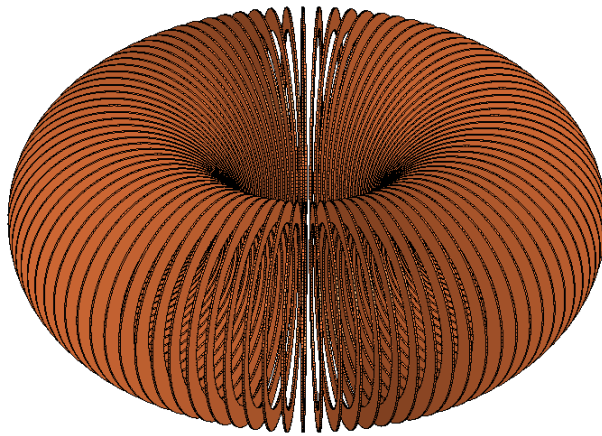


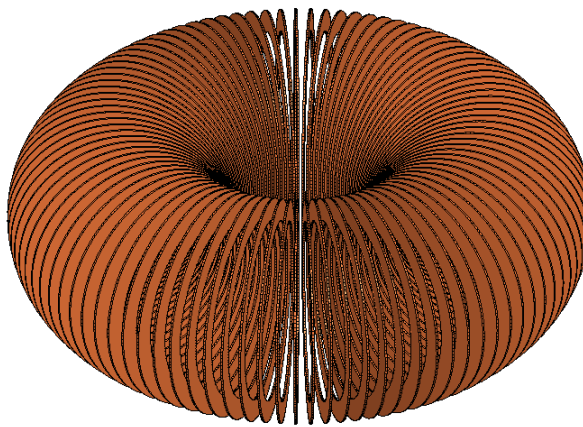
그림 4.4 DI-BSCCO의 수직 자장에 따른 임계전류

Fig. 4.4 The B_n - I_c characteristic of DI-BSCCO

이러한 조건에서 두 방법을 이용해 최적 설계를 진행한 결과 그림 4.5와 같은 형상의 두 모델이 최적 설계안으로 도출되었다. 두 모델의 구체적인 수치들은 표 4.2에 정리하였다.



모델1



모델2

그림 4.5 BSCCO를 사용한 500kJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계안 형상

Fig. 4.5 Shape of 500kJ toroidal SMES using BSCCO

표 4.2 BSCCO 선재를 이용한 500kJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계 결과

Table 4.2 Optimization result of 500kJ toroidal SMES using BSCCO

	제안된 설계기법을 이용한 최적설계 모델 (모델1)	기존 설계기법을 이용한 최적설계 모델 (모델2)
N_p (개)	99	96
r (mm)	391	389
a (mm)	197	198
N (턴)	204	201
I (A)	207	211
에너지 (kJ)	525.9	524.8
load factor	0.70	0.69
중심 자속밀도 (T)	2.14	2.09
최대 수평 자속밀도 (T)	3.25	3.16
최대 수직 자속밀도 (T)	0.79	0.67
총 선재 길이 (km)	28.0	26.8
최적설계 소요시간	5초	124시간

그림 4.5와 표 4.2에서 알 수 있듯이 제안된 설계기법을 이용한 최적 설계 결과는 유한요소해석을 통한 최적 설계 결과에 매우 근접하였다. 따

라서 모델1을 그대로 최종 설계안으로 이용하거나, 이 모델을 기준으로 유한요소해석과 결정론적 최적화 방법을 이용해 빠르게 모델2와 같은 결과를 쉽게 얻을 수 있다.

최적 설계 결과가 서로 근접하는 반면, 설계에 소요되는 시간에는 큰 차이를 보이는데, 모델1의 설계에는 최적 설계에는 약 5초 정도의 시간 밖에 걸리지 않는데 비해, 유한요소해석을 이용한 최적 설계에는 약 124시간 정도가 소요되었다. 또한 모델1을 기점으로 간단한 결정론적 최적화 방법인 패턴탐색기법과 유한요소해석을 통해 모델2를 도출하는데 걸린 시간은 12시간 정도였다.

4.3.2 YBCO CC 선재를 이용한 500kJ 토로이드형 SMES 최적설계

다양한 선재에 대한 제안된 설계기법의 적용 가능성을 살펴보기 위해 같은 500kJ급의 에너지를 가지면서 다른 종류의 선재를 사용하는 토로이드형 SMES의 최적 설계를 진행하였다.

BSCCO 선재를 대신 YBCO CC 선재를 사용하였으며, 선재의 기계적 특성은 표 4.3과 같다. BSCCO 모델과 마찬가지로 20K의 온도에서 설계를 진행하였으며, 이 온도에서 YBCO CC 선재의 임계전류 특성은 그림 4.6과 같다.

표 4.3 YBCO CC 선재의 기계적 특성 (AMSC 제공)

Table 4.1 Mechanical characteristic of YBCO CC

Average Width	4 mm
Average Thickness	0.4 mm
Maximum rated tensile stress* (77K)	200 MPa
Maximum rated wire tension* (77K)	30 kg
Critical Tensile Strain* (77K)	0.3 %
Critical Double Bend Diameter* (RT)	35 mm

* 95% I_c Retention

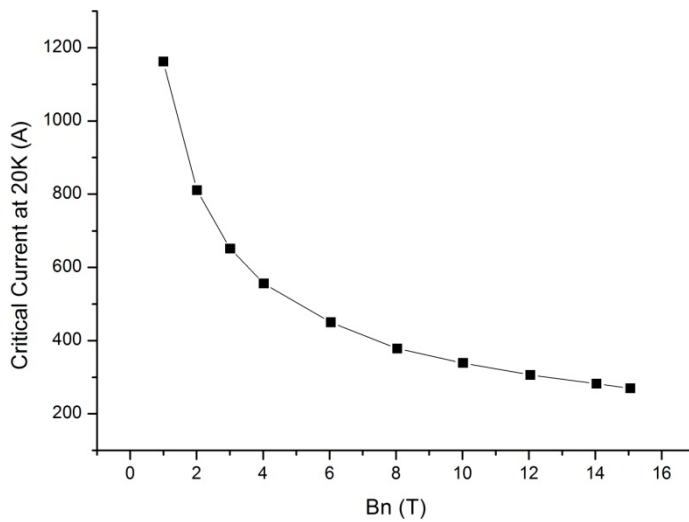
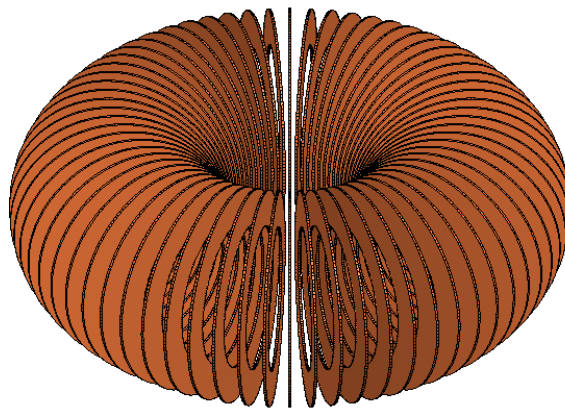


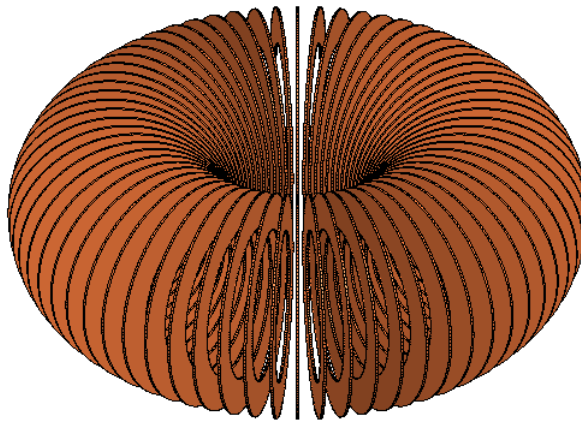
그림 4.6 YBCO CC 선재의 임계전류 특성

Fig. 4.6 B_n - I_c characteristic of YBCO CC

선재 외의 다른 모든 제한조건을 일치시킨 후, 최적설계를 진행한 결과 그림 4.7과 같은 형상의 두 모델이 최적 설계안으로 도출되었다. 두 모델의 구체적인 수치들은 표 4.4에 정리하였다.



모델1



모델2

그림 4.7 YBCO CC 선재를 사용한 500kJ급 토로이드형 SMES 코일의
최적 설계안 형상

Fig. 4.7 Shape of 500kJ toroidal SMES using YBCO CC

표 4.4 YBCO CC 선재를 이용한 500kJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계 결과

Table 4.4 Optimization result of 500kJ toroidal SMES using YBCO CC

	제안된 설계기법을 이용한 최적설계 모델 (모델1)	기존 설계기법을 이용한 최적설계 모델 (모델2)
N_p (개)	68	68
r (mm)	283	282
a (mm)	119	122
N (턴)	147	143
I (A)	579	573
에너지 (kJ)	526.6	524.9
load factor	0.70	0.70
중심 자속밀도 (T)	4.09	3.99
최대 수평 자속밀도 (T)	7.32	7.31
최대 수직 자속밀도 (T)	1.97	1.95
총 선재 길이 (km)	9.3	9.2
최적설계 소요시간	5초	97시간

그림 4.7과 표 4.4에서도 알 수 있듯이 YBCO CC 선재를 이용한 500kJ 토로이드형 SMES의 최적 설계안도 모델1과 모델2가 매우 근접하는 것을 알 수 있다. 해석시간은 모델1의 경우 마찬가지로 약 5초 정도가 소요되었으며, 모델2의 경우에는 97시간이 걸렸다.

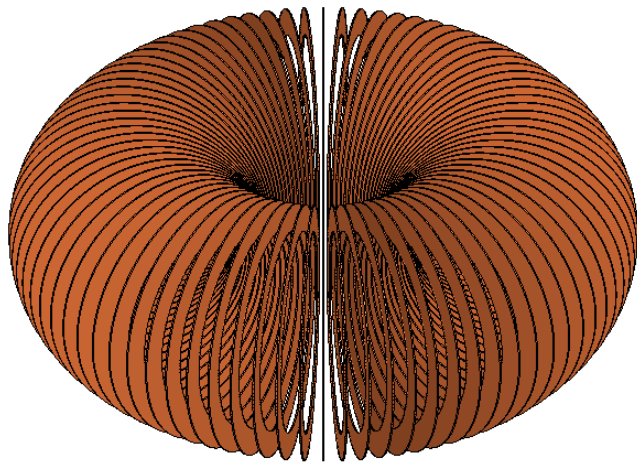
BSCCO 선재와 YBCO CC 선재를 사용한 최적 설계안들을 비교해보면, YBCO CC 선재를 사용한 모델들이 전체적인 크기가 작고, 선재 사용량이 훨씬 적은 것을 알 수 있다. 이는 선재의 특성 때문인데, 사용한 YBCO CC 선재는 BSCCO보다 높은 자장 하에서도 높은 임계전류를 유지하기 때문에 운전 전류를 높일 수 있다. 실제로 운전전류를 비교해보면, YBCO CC 모델의 운전전류가 BSCCO 모델의 운전전류보다 2배 이상 높다는 것을 알 수 있다. 선재의 특성은 이와 같이 선재사용량에 큰 영향을 미치기 때문에 비싸더라도 성능이 좋은 선재를 사용할 경우 총 제작비용은 더 적어질 수도 있다.

4.3.3 4MJ 토로이드형 SMES 최적설계

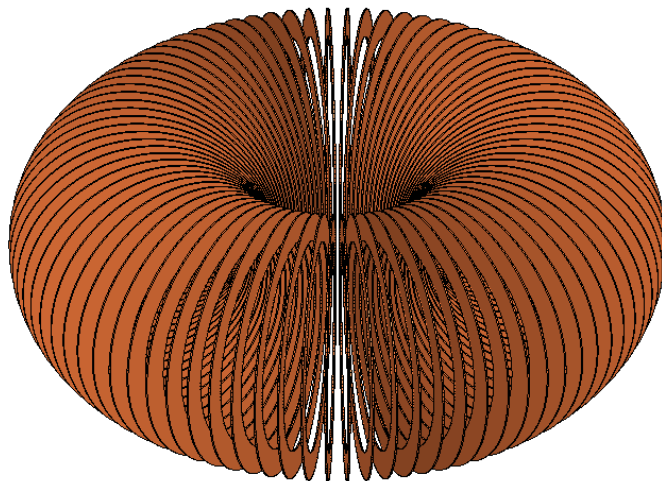
4MJ 토로이드형 SMES의 최적설계는 다른 에너지 규모를 갖는 설계목표에 대해서도 제안된 기법이 유용한지를 알아보기 위해 진행되었다.

선재는 4.3.2절과 같은 YBCO CC 선재를 같은 온도에서 사용하였다. 더 큰 규모의 SMES이기 때문에 중심에서 모듈까지의 거리 제한은 150mm로 증가시켰으며, 각 모듈 사이의 간격도 7mm 이상이 되도록 하였다. 토로이드의 최대 크기에는 역시 제한을 주지 않았다.

이러한 조건 하에서 최적설계를 진행한 결과 그림 4.7과 같은 형상의 두 모델이 최적 설계안으로 도출되었다. 두 모델의 구체적인 수치들은 표 4.5에 정리하였다.



모델1



모델2

그림 4.8 4MJ급 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계안 형상

Fig. 4.8 Shape of 4MJ toroidal SMES

표 4.5 4MJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계 결과

Table 4.5 Optimization result of 4MJ toroidal SMES

	제안된 설계기법을 이용한 최적설계 모델 (모델1)	기존 설계기법을 이용한 최적설계 모델 (모델2)
N_p (개)	84	86
r (mm)	480	481
a (mm)	260	261
N (턴)	173	171
I (A)	670	661
에너지 (MJ)	4.19	4.20
load factor	0.70	0.69
중심 자속밀도 (T)	4.06	4.04
최대 수평 자속밀도 (T)	11.3	10.9
최대 수직 자속밀도 (T)	1.39	1.41
총 선재 길이 (km)	26.9	27.3
최적설계 소요시간	6초	141시간

그림 4.8과 표 4.5에서 알 수 있듯이 더 큰 규모의 토로이드형 SMES에 대해서도 제안된 설계기법은 유용하다는 것을 알 수 있다. 이 설계안에서 주목할 점은 저장 에너지와 총 선재 길이가 비례하지는 않는 것이다.

따라서 설계 여하에 따라서 큰 규모의 SMES일수록 선재 사용량 대비 저장에너지량이 증가하여 경제적으로 유리할 수 있을 것이라는 추측을 해 볼 수 있다. 이보다 더욱 큰 2GJ SMES는 [88]을 참고하여 진행하였으며 그 결과는 부록 C에 수록하였다.

4.3.4 동작 온도에 따른 선재량 최적화 결과

SMES는 선재 특성, 온도, 형상 등 많은 요소가 민감하게 성능을 좌우한다. 하지만 이러한 요소를 모두 고려하며 종합적인 최적화를 수행하기에는 이전 설계방법의 소요시간이 지나치게 많다. 따라서 선재 및 동작온도의 선택은 최적화 단계를 거치지 않고 설계자의 경험의 의존하는 경우가 많았다.

선재의 경우에는 선택할 수 있는 선재종류가 많지 않을 경우, 앞의 4.3.1절, 4.3.2절과 같이 사용선재만을 변경시키면서 최적화를 진행해 최소 선재량 및 선재단가를 고려하여 선재 선택을 할 수 있을 것이다. 하지만 온도의 경우에는 값이 연속적이고, 온도에 따른 최소 선재량이 불규칙하게 변하기 때문에 좁은 간격의 온도에 대해 많은 최적화 샘플이 필요하게 된다. 이전 설계방법으로는 이렇게 많은 최적화 샘플을 구하기에는 소요 시간이 지나치게 길어진다. 하지만 앞선 최적설계 결과들에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안된 설계기법은 유한요소법을 이용한 설계기법과 거의 같은 설계안을 도출하면서 설계시간을 획기적으로 감소시키고 있다. 따라서 짧은 시간 안에 다양한 온도에서의 최소선재량을 검토하여 비교할

수 있다.

그림 4.9는 제안된 설계기법을 이용해 동작온도에 따라 어떻게 최소 선재량이 바뀌는지 나타내었다. 설계대상은 2MJ의 저장에너지를 가지며, 선재는 같은 YBCO CC를 사용하였다.

동작온도가 낮을수록 선재에 흘릴 수 있는 전류가 커지므로 사용되는 선재량이 줄어든다는 것은 설계 전에도 예측할 수 있다. 하지만, 그림 4.9는 온도와 최소 선재량이 단순한 상관관계를 갖지 않는다는 것을 보여준다. 따라서 이러한 그래프를 이용하면 온도에 따른 선재량, 시스템의 크기, 냉각시스템 등을 종합적으로 고려하여, 가장 경제적으로 목표 저장 에너지를 달성할 수 있는 동작온도를 설정할 수 있을 것이다.

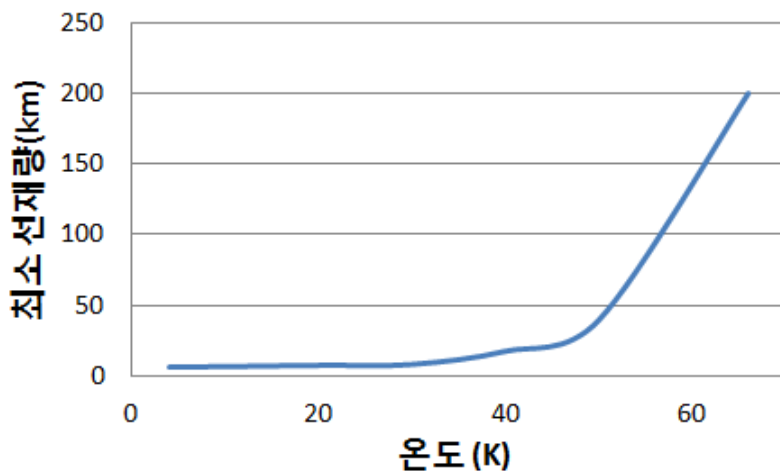


그림 4.9 동작온도에 따른 최소 선재량

Fig. 4.9 Minimum length of conductor at different operating temperature

제5장 결론

5.1 결론 및 토의

본 논문에서는 고온 초전도 선재를 이용한 토로이드형 SMES코일의 설계기법을 제안하였고, 이를 이용한 최적설계안들의 정확도와 설계시간을 확인하여 그 유효성을 검증하였다.

우선 토로이드형 SMES 코일의 설계과정을 단계별로 풀어 쓰고, 각 단계에서 고려해야 할 점이나 발생하는 문제의 해결법을 제시하였다. 코일 설계에 들어가기에 앞서 코일의 주변환경을 이루고 있는 구성요소에 대해 설명하였으며, 코일 설계의 첫 단계인 선재 및 냉각시스템 선택에 있어서 고려할 점들을 짚어보았다. 그 다음으로 설계변수에 대한 분석을 통해 최적화 설계를 적용할 변수를 선별하였고, 이들을 통해 저장 에너지, 중심 자장 등을 해석적으로 계산하였다. 설계 과정에서 선재에 가해지는 수평, 수직자장을 여러 번 구해야 하는데, 이는 해석적으로 풀어내기 어렵기 때문에 데이터 테이블을 구축하여 문제를 해결하였다. 데이터 테이블의 크기를 최대한 줄이면서 다양한 규모의 토로이드형 SMES에 적용 가능하게 하기 위해서 많은 모델에 대해 해석 및 결과분석이 이루어졌으며, 이를 토대로 설계변수의 비율을 사용하거나, 불필요한 요소를 제외시키는 등의 방법으로 효율적인 데이터 테이블을 만들 수 있었다. 이러한 데이터 테이블의 적용으로 유한요소해석 없이 토로이드형 SMES 코일을 설계할 수 있는 방법을 제안할 수 있었다.

제안된 설계기법의 유용성을 확인하기 위해 확률론적인 최적화기법인 ES와 결합하여 최적 설계를 진행하였고, 최적 설계 대상은 BSCCO 선재를 사용한 500kJ, YBCO CC 선재를 사용한 500kJ, YBCO CC 선재를 사용한 4MJ 토로이드형 SMES 코일이었다. 도출된 최적 설계안은 병행하여 진행한 유한요소해석을 통한 최적 설계안과 비교하였다. 제안된 설계기법을 이용하여 최적 설계된 모델들은 유한요소해석을 이용한 모델들과 거의 같았으며, 설계 시간은 약 5초 정도밖에 걸리지 않아 유한요소해석을 이용한 설계가 평균 1주일 정도 걸리는 것과 비교했을 때 획기적으로 설계시간을 줄일 수 있다는 것을 확인하였다.

SMES의 설계는 코일 설계 이후, 열 해석, 구조 설계 등의 과정을 추가로 거치게 되는데, 이 때문에 코일 설계에 대한 요구조건이 변경되면서 다시 코일 설계를 하는 과정을 여러 번 거치는 것이 대부분이다. 따라서 코일의 최적설계에 몇 일 이상의 시간이 소요될 경우, 전체 시스템의 설계시간은 기하급수적으로 늘어나게 된다. 이러한 점에 있어 제안된 설계기법을 이용하여 코일 설계 시간을 초 단위로 줄이는 것은 큰 의미를 가진다고 할 수 있다.

또한 토로이드형 SMES는 선재 특성, 온도, 형상 등 많은 요소가 민감하게 성능을 좌우하기 때문에 이들 각각에 대한 최적화가 필요하다. 이전 설계방법으로는 소요되는 시간 문제로 이러한 최적화가 거의 불가능하였지만, 제안된 설계기법은 빠른 시간 안에 방대한 양의 설계안을 검토할 수 있기 때문에 이들에 대한 종합적인 최적화를 가능하게 해준다는 점에

서 의의가 있다. 특히 GJ급의 대용량 SMES의 경우 설계에 대한 경험이 거의 없어 설계 시작점을 정하는 것도 어렵기 때문에 설계자 경험의 영향을 최소화할 수 있는 확률론적 최적화기법의 활용이 필요하다. 제안된 설계기법은 확률론적 최적화기법과의 결합하여도 매우 짧은 시간 안에 최적 설계를 마칠 수 있기 때문에, 향후 더 큰 에너지 저장량을 가지는 토로이드 SMES 설계에 많은 도움을 주리라 판단된다.

5.2 향후 계획

본 연구에서는 코일의 전자기적인 설계에 주안점을 두었지만, 향후 연구에서는 코일의 응력과 손실에 대한 고려를 통해 설계기법을 발전시킬 필요가 있다. 고온 초전도 선재의 성능이 향상되면서 선재에 흘릴 수 있는 전류 크기는 계속해서 증가하고 있으며, 이 때문에 발생하는 로렌츠 힘이 최적설계에 영향을 미치는 연구 사례가 늘고 있다. 또한 짧은 시간에 큰 전력을 방출하는 SMES의 장점을 최대한 살리기 위해서는 충방전 시에 발생하는 교류손실에 대한 고려가 필요하다. 현 단계에서는 도출된 최종 설계안의 응력과 손실을 계산하여 확인하는 정도에 그치고 있지만, 향후에는 이 두 요소에 대한 해석적 계산법을 찾아 설계기법에 합쳐야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Jeffery E. Dagle, "Postmodern Analysis of Power Grid Blackouts," *IEEE power & energy magazine*, Aug. 2006.
- [2] 김병상, "전력품질의 이해 및 전력장애에 따른 보호 기술," *전력기술* 인, Nov. 2003
- [3] 한국에너지자원기술기획평가원, "초전도", *그린에너지 전략 로드맵*, Apr. 2009.
- [4] 도윤미, 김석진, 허태욱, 박노성, 김현학, 홍승기, 서정해, 전종암, "스마트 그리드 기술 동향: 전력망과 정보통신의 융합기술," *전자통신동향 분석*, 24권, 5호, 2009.
- [5] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications," *Proceedings of the IEEE*, Vol.89, No.12, Dec. 2001.
- [6] H. Chen, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, Vol.19, pp.291-312, 2009.
- [7] J. K. Kaldellis, "Stand-alone and hybrid wind energy systems. Technology, energy storage and applications," *Woodhead Publishing Series in Energy*, No.6, 2010.

- [8] S.M. Shoenung, "Characteristics and technologies for long- vs. short-term energy storage," *United States Department of Energy*; Mar. 2001.
- [9] Phil Mckenna, "Superconducting Magnets for Grid-Scale Storage," *Technology Review, Energy*, Mar. 2011.
- [10] Mohd. Hasan Ali, Bin Wu, Roger A. Dougal, "An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems," *IEEE Transactions on sustainable energy*, Vol.1, No.1 Apr. 2010.
- [11] D. S. Padimiti and B. H. Chowdhury, "Superconducting magnetic energy storage system (SMES) for improved dynamic system performance," *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1–6, Jun. 2007.
- [12] M. Parizh, A. K. Kalafala, and R. Wilcox, "Superconducting magnetic energy storage for substation applications," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol.7, No.2, pp.849–852, Jun. 1997.
- [13] Ju Wen, Jian X. Jin, You G. Guo, Jian G. Zhu, "Theory and Application of Superconducting Magnetic Energy Storage," *Australian Universities Power Engineering Conference*, Dec. 2006.
- [14] Hanan Tahir Baiej, "Theory and Application of Superconducting Magnetic Energy Storage," *University of Wollongong*, 2013.
- [15] Arnaud Badel, "Superconducting Magnetic Energy Storage using High Temperature Superconductor for Pulse Power Supply," *Universite de grenoble*,

Dec. 2011.

- [16] Christopher John Hawley, “Design and manufacture of a high temperature superconducting magnetic energy storage device,” *University of Wollongong*, 2005
- [17] Weijia Yuan, “Second-Generation High-Temperature superconducting Coils and Their Applications for Energy Storage,” *University of Cambridge*, 2011.
- [18] T. Morisue and T. Yajima, “A method of increasing magnetic energy of superconducting magnetic energy storage,” *Journal of Applied Physics*, Vol.75, 1994
- [19] So Noguchi, Hideo Yamashita, and Atsushi Ishiyama, “An Optimal Design Method for SMES Coils Using HTS Tapes,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 12, No. 1, Mar. 2002.
- [20] O. Vincent-Viry, A. Mailfert, and D. Trassart, “New SMES Coil Configurations,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 11 , No. 1, Mar. 2001.
- [21] Hiroaki Tsutsui, Shinichi Nomura, and Ryuichi Shimada, “Optimization of SMES Coil by Using Virial Theorem,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 12, No. 1, Mar. 2002.
- [22] Qiuliang Wang, Cheon Seong Yoon, Sungkeun Baang, Keeman Kim, and Wohoo Chung, “Simulation of Dynamic Stress in PF Superconducting

- Magnets for KSTAR Under Normal Operating Conditions,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 13, No. 2, Jun. 2003.
- [23] D.S. Robin, D. Arbelaez, S. Caspi, C. Sun, A. Sessler, W. Wan, M. Yoon, “Superconducting toroidal combined-function magnet for a compact ion beam cancer therapy gantry,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 659, pp. 484–493, 2011.
- [24] Min Zhang, J. Kvitkovic, C. H. Kim, S. V. Pamidi, and T. A. Combs, “Study of 2G high temperature superconducting coils: Influence of anisotropic characteristics,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, 2013.
- [25] So Noguchi, Hideo Yamashita, and Atsushi Ishiyama, “An Optimization Method for Design of SMES Coils Using YBCO Tape,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 13, No. 2, Jun. 2003.
- [26] B Kondratowicz-Kucewicz, T Janowski, S Kozak, J Kozak, G Wojtasiewicz, M Majka, “Bi-2223 HTS winding in toroidal configuration for SMES coil,” *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 234, 2010.
- [27] Ji Hoon Kim, Woo-Seok Kim, Song-Yop Hahn, Jae Moon Lee, Myung Hwan Rue, Bo Hyung Cho, Chang Hwan Im, and Hyun Kyo Jung, ” Characteristic Test of HTS Pancake Coil Modules for Small-Sized SMES,” *IEEE*

- TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 15, No. 2, Jun. 2005.
- [28] Jian Xun Jin, Zheng Guang Wang, You Guang Guo and Jian Guo Zhu, “High Temperature Superconducting Energy Storage Techniques,” *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.15, 2007.
- [29] Yasuo Kanamori, Seinosuke Uno, Chizuru Suzawa, Michihiko Watanabe, “Study on High Temperature Superconducting Coil for SMES,” IEEE, 1998.
- [30] Myungjin Park, Sangyeop Kwak, Sangyeop Lee, Woo-seok Kim, Jikwang Lee, Kyeongdal Choi, Joonhan Bae, Seokho Kim, Kiduk Sim, Kichul Seong, Hyunkyo Jung, Songyop Hahn, “Analysis of Eddy Current Loss in Conducting Cooling Plate for 600 kJ SMES,” *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, Oct. 2007.
- [31] Constantinos Minas, Lembit Salasoo, “THREE-DIMENSIONAL THERMAL STRESSES IN A SUPERCONDUCTING COIL ASSEMBLY,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 27, No. 2, MARCH 1991.
- [32] Karasik V.R., Konjukhov A.A, Malginov V. A. ,Sidorov M. V., “DEVICE FOR INVESTIGATION OF MECHANICAL STRESSES IN SUPERCONDUCTING WINDINGS,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 27, No. 2, Mar. 1991.
- [33] Yong-hwan Kim, Sang-ho Kim, Young-hwan Kim, Han-sung Kim and Kie-

- hyung Chung, "Mechanical Analysis of the KSTAR CS Model coil," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 9, No. 2, Jun. 1999.
- [34] L. I. Greben, E. S. Nironov, H. H. Moustafin, "MECHANICAL STRESSES AND STRAINS IN SUPER CONDUCTING DIPOLE MAGNETS FOR HIGH ENERGY ACCELERATORS," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 15, No. 1, Jan. 1979.
- [35] M.ARATA, T.HAMAJIMA. O.OHSAKI. S.HANAWA, "Radial Stress Influence on High Current Density Superconducting Magnet Performance with Large and Small Bore," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VL. 32, No. 4, JULY 1996.
- [36] Myung-Jin Park, Sang-Yeop Kwak, Woo-Seok Kim, Seung-Wook Lee, Seung-Yong Hahn, Ji-Kwang Lee, Jin-Ho Han, Kyeong-Dal Choi, Hyun-Kyo Jung, Ki-Chul Seong, and Song-yop Hahn, "Stress Analysis of HTS Magnet for a 600 kJ SMES," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 17, No. 2, JUNE 2007.
- [37] Kwangmin Kim, A-Rong Kim, Jin-Geun Kim, Minwon Park, In-Keun Yu, Myung-Hwan Sohn, Bum-Yong Eom, Kidoek Sim, Seokho Kim, Hae-Jong Kim, Joon-Han Bae, and Ki-Chul Seong, "Analysis of Operational Loss Characteristics of 10 kJ Class Toroid-Type SMES," *IEEE TRANSACTIONS*

- ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 21, No. 3, Jun. 2011.
- [38] K.Shimada, S.Hanai, L.Kushida, K.Hirabayashi, T.Kobayashi, T. Shimonosono H.Hayashi, K.Tsutsumi, F.Irie, Y .Horiuchi and T.Ezaki, Experimental and Analvtical Studies on Mechanical Behavior of Superconducting Coil for SMES,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol.11 , No. 1 , Mar. 2001.
- [39] S. Nomura, H. Tsutsui, N. Watanabe, C. Suzuki, S. Kajita, Y. Ohata, T. Takaku, E. Koizumi, S. Tsuji-Lio, and R. Shimada, “Demonstration of the Stress-Minimized Force-Balanced Coil Concept for SMES,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 13, No. 2, Jun. 2003.
- [40] S. Nomura, K. Yamagnta, N. Watauabe, D. Ajiki, H. Ajikawa, E. Koizumi, Experiment of HTS Stress-Balanced Helical Coil,” *TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCODUCTIVITY*, Vol. 10, No. 1. Mar. 2000.
- [41] H. Tsutsui, S. Kajita, Y. Ohata, S. Nomura, S. Tsuji-Iio, and R. Shimada, “FEM Analysis of Stress Distribution in Force-Balanced Coils,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 14, No. 2, Jun. 2004
- [42] S. Nomura, T. Osaki, J. Kondoh, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, Y. Sato and R. Shimada, “Force-Balanced Coil for Large Scale SMES,” *IEEE*

- TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 9, No. 2, Jun. 1999.
- [43] Sangjin Lee, "Calculation of Normal Fields to Superconducting Tape of Toroidal Type Winding With Circular Section," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 20, No. 3, JUNE 2010.
- [44] So Noguchi, Makoto Tsuda, "An Optimal Configuration Design of Superconducting Magnets with HTS Tapes for DC Reactor," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 20 No. 3, pp.1814-1817, Jun. 2010.
- [45] Florian STEFANESCU, Alin-Iulian DOLAN, "CONCEPTUAL DESIGN OF 21 kJ SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE DEVICE," *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, No. 34, 2010.
- [46] I. Shilon, A. Dudarev, H. Silva and H. H. J. ten Kate, "Conceptual Design of a New Large Superconducting Toroid for IAXO, the New International AXion Observatory," *physics.ins-det*, Dec. 2012.
- [47] P. Tixador, B. Bellin, M. Deleglise, J. C. Vallier, C. E. Bruzek, S. Pavard, and J. M. Saugrain, "Design of a 800 kJ HTS SMES," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 15, No. 2, JUNE 2005.
- [48] Seyeon Lee, Kyung-Pyo Yi, Sang Ho Park, Ji-Kwang Lee, Woo-Seok Kim,

- Chan Park, Joon-Han Bae, Ki-Chul Seong, Ilhan Park, Kyeongdal Choi, and Songyop Hahn, "Design of HTS Toroidal Magnets for a 5 MJ SMES," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 22, No. 3, JUNE 2012.
- [49] K. Tsuchiya, K. Kizu, Y. M. Miura, T. Ando, T. Isono, K. Matsui, N. Koizumi, M. Matsukawa, A. Sakasai, and S. Ishida, "Design of Toroidal Field Coil for the JT-60 Superconducting Tokamak," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 13, No. 2, JUNE 2003.
- [50] M. Shimizu, Y. Tanabe, T. Yoshioka, K. Takeda, T. Hamajima, N. Miki, Y. NakaYama, M. Udo, N. Takeda, H. Miyazaki, K. Kamemura and M. Yamamoto, "FESIBILITY STUDY OF A 10-GWh TOROIDAL SUPERCONDUCTIVE MAGNETIC ENERGY STORAGE SYSTEM," *JOURNAL DE PHYSIQUE*, Vol. 45, 1984.
- [51] Florian STEFANESCU, "GEOMETRY OPTIMIZATION OF SMES COIL," *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, No. 35, 2011.
- [52] Chang-Hwan Im, Hyun-Kyo Jung, Ji-Hoon Kim, Song-Yop Hahn and Sung-Chin Hahn, "Three-dimensional constrained optimization of modular toroid-type SMES using co-evolutionary algorithm," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 20, 2004.

- [53] V. Lombardo, E. Barzi, D. Turrioni and A. V. Zlobin, “Critical Currents of YBa₂Cu₃O_{7-δ} Tapes and Bi₂Sr₂CaCu₂O_x Wires at Different Temperatures and Magnetic Fields,” *FERMILAB-CONF*, 2007.
- [54] 홍계원, “2세대 고온초전도 선재의 저가화공정개발 현황 및 전망,” *세라미스트*, 15권 6호, 2012.
- [55] D. Lieurance, F. Kimball, and C. Rix, C. Luongo, “Design and Cost Studies for Small Scale Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Systems,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 5, No. 2, Jun. 1995.
- [56] M. R. Alizadeh Pahlavani, A. Shiri, and A. Shoulaie, “3-D Analysis of Magnetic Flux Density in Modular Toroidal Coil Using Cubic Meshing,” *PIERS Proceedings*, Mar. 2010.
- [57] Damijan Miljavec, Bogomir Zidarič, Tomaž Gyergyek, “3-D Magnetic Field Calculation in Aerial Toroidal Coil System Arrangement,” *Nuclear Energy for New Europe*, 2005.
- [58] Yu. Vasesky, Yu. Rotachev, “An Analytical Model for Analysis of Magnetic Fields and Forces in Thin Toroidal System with Tilted Coils,” *International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”*, 2004.
- [59] M. R. Alizadeh Pahlavani, A. Shiri, H. A. Mohammadpour, and A. Shoulaie, “Magnetic Flux Density Analysis of Helical Toroidal Coil Using Finite

Element Approach,” *PIERS Proceedings*, Mar. 2010.

- [60] David Connolly, “An investigation into the energy storage technologies available, for the integration of alternative generation techniques,” *Energy Storage Report*, UNIVERSITY of LIMERICK, 2007.
- [61] M. Herr, “Economics of Integrated Renewables and Hydrogen Storage Systems in Distributed Generation,” *Technology and Medicine. University of London: Imperial College of Science*, 2002.
- [62] Wong, I. H. “An Underground Pumped Storage Scheme in the Bukit Timah Granit of Singapore,” *Tunnelling and Underground Space Technology* , Vol. 11, No.4, pp. 485-489, 1996.
- [63] Argonne National Laboratory, “Compressed Air Energy Storage (CAES) in Salt Caverns,” Oct. 2007.
- [64] G. J. Ball, P. Lex, B. L. Norris & V. Scaini. “Grid-Connected Solar Energy Storage Using The Zinc-Bromine Flow Battery,” *ZBB Energy Corporation*, 2002.
- [65] C. Menictas, D.Hong, Z. Yan, J. Wilson, M. Kazacos, M. Skyllas-Kazacos, “Status of the Vanadium Redox Battery Development Program,” *Electrical Engineering Congress '94*, pp. 299-306, 1994.
- [66] G. Sheppard, “Flywheels - A look to the future...” *University of Prince Edward Island*, Oct. 2007.

- [67] 한국과학기술정보연구원, “슈퍼캐패시터,”
- [68] Knut Erik Nielsen, “Superconducting magnetic energy storage in power systems with renewable energy sources,” *Norwegian University of Science and Technology*, Jun. 2010.
- [69] J. Schwartz, E.E. Burkhardt, William R. Taylor, “Preliminary Investigation of Small Scale Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Systems,” *USACERL Technical Report 96/41*, Jan. 1996.
- [70] S.C. Tripathy, “SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE”, *Livewire*, Vol. 1, Issue. 1, 2005.
- [71] Matthew J. Superczynski, “ANALYSIS OF THE POWER CONDITIONING SYSTEM FOR A SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE UNIT,” *Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2000.
- [72] Xiao-Yuan Chen, Jian-Xun Jin, Kai-Meng Ma, Ju Wen, Ying Xin, Wei-Zhi Gong, An-Lin Ren, and Jing-Yin Zhang, “High Temperature Superconducting Magnetic Energy Storage and Its Power Control Technology,” *JOURNAL OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA*, Vol. 6, No. 2, JUNE 2008.
- [73] Darmawan Sutanto, “Improved controller for high temperature super conducting magnetic energy storage (HTS-SMES),” *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and*

Electromagnetic Devices, September 2009.

- [74] X. Huang, Y. M. Eyssa and G.E. McIntosh, "TWO-LAYER SUPERCONDUCTIVE MAGNETIC ENERGY STORAGE STRUCTURE AND PROTECTION SYSTEM DESIGN," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 23, No. 5, SEPTEMBER 1987.
- [75] S. M. Schoenung, W. R. Meier, W. J. Schafer, W. V. Hassenzahl, "A COMPARISON OF LARGE-SCALE TOROIDAL AND SOLENOIDAL SMES SYSTEMS," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 27, No. 2, MARCH 1991.
- [76] W. Hassenzahl, "A COMPARISON OF THE CONDUCTOR REQUIREMENTS FOR ENERGY STORAGE DEVICES MADE WITH IDEAL COIL GEOMETRIES," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 25, No. 2, MARCH 1989.
- [77] So Noguchi, Atsushi Ishiyama, S. Akita, H. Kasahara, Y. Tatsuta, and S. Kouso, "An Optimal Configuration Design Method for HTS-SMES Coils," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 15, No. 2, JUNE 2005.
- [78] Thomas A. Painter, "Conceptual Design of a Superconducting 30 T Solenoid Using Wire-in-Conduit Conductors," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 15, No. 2, JUNE 2005.

- [79] Huub Weijers, “High-temperature superconductors in high-field magnets,” *Florida State University*, 2009.
- [80] 오상수, 류강식, 김상현, “고온초전도체의 최근의 개발 동향,” *The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol. 7, No. 3, pp. 262-269, 1994.
- [81] 홍계원, “초전도 선재와 전력기기 응용,” *물리/학과 첨단기술*, Sep. 2011.
- [82] N Ayai, T Kato, J Fujikami, S Kobayashi, M Kikuchi, K Yamazaki, S Yamade, T Ishida, K Tatamidani, K Hayashi, K Sato, R Hata, H Kitaguchi, H Kumakura, K Osamura and J Shimoyama, “DI-BSCCO Wire with I_c over 200 A at 77 K,” *8th European Conference on Applied Superconductivity*, 2007.
- [83] Kenji Tasaki, Michitaka Ono, Toru Kuriyama, Makoto Kyoto, Satoshi Hanai, Hiroyuki Takigami, Hirohisa Takano, Kazuo Watanabe, Satoshi Awaji, Gen Nishijima, and Kazumasa Togano, “Development of a Bi2223 Insert Coil for a Conduction-Cooled 19 T Superconducting Magnet,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 15, No. 2, JUNE 2005.
- [84] Hyung-Seop Shin, John Ryan C. Dizon, Ki-Hyun Kim, Sang-Soo Oh, and Dong-Woo Ha, “Fatigue Behavior and Its Influence on the Critical Current of Externally Reinforced Bi-2223 Superconducting Tape,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 15, No. 2,

JUNE 2005.

- [85] Peter J. Lee, “Superconductor: WIRES AND CABLES: MATERIALS AND PROCESSES,” *ENCYCLOPEDIA OF MATERIALS: SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2003
- [86] Tomoaki Takao, Toru Ito, Kenji Umekawa, Yuta Fukasawa, Hideki Tanaka, and Masaichi Umeda, “Influence of Compressive Length of Normal Stress on Degradation in Bi-2223 Tapes,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 15, No. 2, JUNE 2005.
- [87] 林 和彦, “ビスマス系高超電導線材の開況,” OHM, Oct. 2004.
- [88] Koji Shikimachi, Naoki Hirano, Shigeo Nagaya, Hiroshi Kawashima, Kohei Higashikawa, and Taketsune Nakamura, “System Coordination of 2GJ Class YBCO SMES for Power System Control,” *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 19, No. 3, JUNE 2009.

부록A 초전도 선재의 응력해석

직류전류가 인가되는 코일의 응력 해석을 위해서는 코일 내부의 모든 점에서의 힘의 균형을 만족하는 조건에 의해 유도되는 편미분방정식을 풀어야 한다. 만일 움직임이 없이 정지된 강체에 대해서 해석 영역 내 전체 힘의 합은 0 이 된다. 그림 A.1 에서는 코일에서의 힘의 평형상태를 나타내고 있다. 코일에서 발생하는 힘은 축 방향과 반경 방향의 로렌츠 힘이며 이때 축 방향의 경우는 중간 지점에서 위와 아래가 정확히 대칭이라고 보고, 절반의 구조에서 발생하는 축 방향 힘 F_z 를 계산하여 이로부터 축 방향 응력 σ_z 를 계산한다. 한편, 반경 방향의 힘 F_r 을 계산하는 과정에서 반경방향의 응력 σ_r 과 후프응력 σ_h 가 결합된 지배방정식을 도출할 수 있다.

반경 방향으로 로렌츠 힘이 작용할 때, 그림 A.1 의 부채꼴 모양의 미세 면적에 힘 평형 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$\sum F_r = -\sigma_r r d\theta + (\sigma_r + d\sigma_r) d\theta - 2\sigma_h dr \sin \frac{d\theta}{2} + \frac{1}{2} J B d\theta \{ (r + dr)^2 - r^2 \} = 0 \quad (A.1)$$

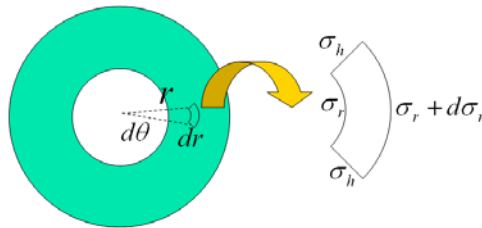


그림 A.1 코일에서의 힘 평형

Fig. A.1 Force equilibrium at the coil

여기서 $d\theta$ 가 매우 작다고 가정하면 $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{d\theta}{2}$ 로 근사화 할 수 있으므로 식 (A.1)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$-\sigma_r r d\theta + (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\theta - \sigma_h dr d\theta + \frac{1}{2}JBd\theta\{(r + dr)^2 - dr^2\} = 0 \quad (\text{A.2})$$

따라서 식 A.2을 통해 아래와 같은 식 A.3 지배 방정식이 도출된다.

$$r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_h + rJ(r)B(r) = 0 \quad (\text{A.3})$$

하지만 방정식에 두개의 변수(σ_r , σ_h)가 들어가 있기 때문에 singularity의 문제가 발생하며 이를 해결하기 위하여 반경방향 변위 u 를 정의하고 새롭게 지배 방정식을 구성 한다. 원주방향 변형률 및 반경방향 변형률과 u 와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_h &= \frac{u}{r} \\ \varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

일반화된 훅의 법칙 (generalized hook's law)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_h &= \frac{\sigma_h}{E_h} - \frac{\nu_{hr}}{E_r} \sigma_r - \frac{\nu_{hz}}{E_z} \sigma_z + \alpha_h \delta T = \frac{\sigma_h}{E_h} - \beta_1 \sigma_h - \beta_2 \sigma_z + \alpha_h \delta T \\ \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \frac{\nu_{rh}}{E_h} \sigma_h - \frac{\nu_{rz}}{E_z} \sigma_z + \alpha_r \delta T = \frac{\sigma_r}{E_r} - \beta_1 \sigma_h - \beta_2 \sigma_z + \alpha_r \delta T \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

식 A.4 와 A.5 를 σ_r , σ_h 에 대해서 정리하면 radial 및 hoop stress 와 u 와의 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다. 단, 아래 식에서 는 axial force 를 면적으로 나누어 계산되는 상수이다.

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \frac{\frac{\varepsilon_h}{E_r} + \alpha_1 \varepsilon_r + X_1}{\Delta} \\ \sigma_r &= \frac{\frac{\varepsilon_r}{E_h} + \beta_1 \varepsilon_h + X_2}{\Delta}\end{aligned}\tag{A.6}$$

여기서

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{1}{E_r E_h} - \alpha_1 \beta_1, \\ X_1 &= \frac{\alpha_2 \sigma_z - \alpha_h \delta T}{E_r} + \alpha_1 (\beta_2 \sigma_z - \alpha_r \delta T), \\ X_2 &= \frac{\beta_2 \sigma_z - \alpha_r \delta T}{E_h} + \beta_1 (\alpha_2 \sigma_z - \alpha_h \delta T), \\ \varepsilon_h &= \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \alpha_1 = \frac{\nu_{hr}}{E_r}, \quad \alpha_2 = \frac{\nu_{hz}}{E_z}, \quad \beta_1 = \frac{\nu_{rh}}{E_h}, \quad \beta_2 = \frac{\nu_{rz}}{E_z},\end{aligned}$$

이다.

따라서, 식 A.4~A.6 을 지배 방정식인 식 A.3 에 대입하여 정리하게 되면 아래와 같은 최종적인 지배 방정식을 도출하게 된다.

$$r \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + (\beta_1 E_h + 1 - \alpha_1 E_h) \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{E_h}{E_r} \frac{u}{r} = -E_h r \Delta J B + (X_1 - X_2) E_h \tag{A.7}$$

즉, 식 A.7 을 지배 방정식으로 하여, 수치 해석을 통해 u 를 먼저 계산한 다음, 계산된 u 를 이용하여 식 A.6 을 통해 응력을 성분 별로 계산하게 된다.

부록 B 진화전략 알고리즘

B.1 최적화 알고리즘의 유형

최적화 알고리즘은 크게 결정론적 최적화 기법과 확률론적 최적화 기법으로 나눌 수 있다. 결정론적 최적화 기법은 최적화 시작점이 같을 경우 매번 정확히 같은 경로로 최적점을 찾아간다. 반대로 확률론적 최적화 기법은 시작점이 같더라도 무작위성을 가지고 매번 다른 경로로 최적점을 향해 간다. 일반적으로 결정론적 최적화 기법은 무작위성을 없애기 때문에 그림 B.1 과 같은 간단한 형태를 가지는 목적함수의 경우 그림 B.2 와 같이 빠르게 최적점을 찾아가는 장점이 있다. 하지만 목적함수가 그림 B.3 과 같이 여러 개의 국소 최적점을 가질 경우, 시작점 선정에 매우 민감해지고, 국소 최적점에 수렴하여 전역 최적점을 찾지 못할 가능성이 커진다. 따라서 국소 최적 점 존재하거나 존재 여부를 모르는 목적함수를 가질 경우, 확률론적 최적화 기법을 선택해야 할 것이다.

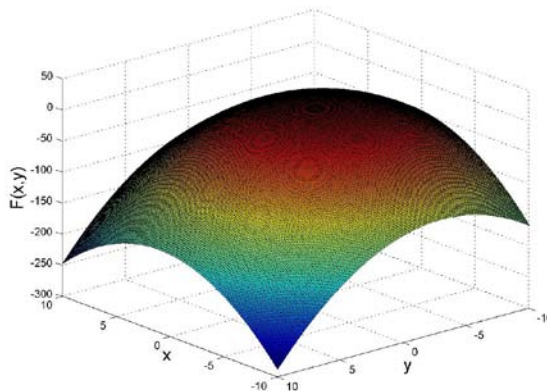


그림 B.1 간단한 목적함수의 예

Fig. B.1 Example of simple objective function

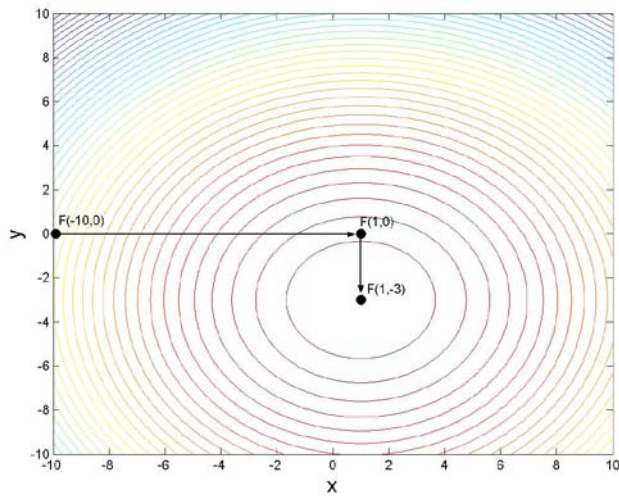


그림 B.2 Univariant method 를 이용한 최적점 탐색

Fig. B.2 Optimization using univariant method

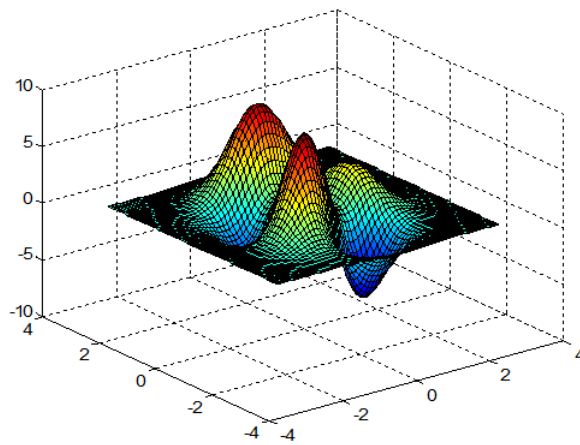


그림 B.3 여러 개의 국소 최적점을 갖는 목적함수

Fig. B.3 Multi-modal objective function

B.2 진화전략 (Evolution Strategy: ES) 알고리즘의 개념 및 특징

ES 는 Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA)과 함께 많이 쓰이는 확률론적 알고리즘의 하나이다. ES 는 개념과 특성상 GA 와 SA 의 중간 정도의 특징을 가진다. 일반적으로 ES 는 GA 보다 수렴이 빠르고, SA 와 달리 수렴 상황을 체크하여 변이폭을 자동적으로 조절하는 Self adaptation 개념을 가지고 있다.

ES 는 기본적으로 실수 함수들을 대상으로 하여 산술적인 최적화를 수행한다. 교차 연산이 사용되기는 하지만 수의 크기를 중심으로 한 산술적인 연산을 사용하며 GA 와 같은 패턴 중심의 교차 연산은 사용하지 않는다. ES 와 GA 의 가장 큰 유사점은 해집단을 사용한다는 것이고, 우수한 해들을 선호한다는 점이다. 단, ES 의 경우 가장 우수한 순서로 선택을 하는데 반해, GA 는 확률적 우선권을 주어 반드시 우수한 해들만이 선택되지는 않는다. 일반적으로 ES 가 GA 에 비해서 적용이 용이하고, 실수 함수 최적화에 있어서 더 빠른 수렴 특성을 가지는 것으로 알려져 있다.

B.3 ES 의 알고리즘

ES 은 자연계의 진화현상에 기반한 최적화 모델이다. 최적화 과정은 다음과 같은 단계를 거쳐 진행된다.

Step 1. 초기해 선택

$(\mu + \lambda)$ 개의 초기해를 전체 변수 범위에 대해서 생성한다. 여기서 μ 은 부모해의 개수, λ 는 자손해의 개수이고, 이들이 첫 세대가 된다. μ 와 λ 가 클수록 많은 해들을 최적화 과정에 판단 자료가 되는 샘플이 늘어나는 것이 되어 최적화 정확도가 올라갈 수 있으나, 최적화 시간이 늘어나게 된다. 따라서 적당한 수를 선택하는 것이 필요하다. 초기해들은 랜덤

하게 생성하거나, 균일하게 변수 범위에 퍼지도록 제한을 걸 수도 있다. 균일하게 변수 범위에 퍼지도록 할 경우, 경우에 따라 국소해에 빠지거나 해가 한 곳에 집중되어 전역 최적점을 찾는데 더 많은 시간이 걸리는 것을 막을 수도 있지만, 목적 함수가 어떠한 분포를 가질지 모르는 상태에서는 랜덤하게 결정하는 것이 더 나을 수도 있다.

Step 2. 선택(Selection)

각 해의 적합도(fitness)를 계산하고 가장 적합도가 높은 해 μ 개를 선택하여 이번 세대의 변이 후보로 정한다. 적합도는 해가 얼마나 우수한지를 나타내는 지표이다. 적합도 계산은 다음과 같이 한다.

$$F_i = (C_w - C_i) + \frac{C_w - C_b}{k-1} \quad (k > 1, k = 3 \text{ or } 4) \quad (\text{B.1})$$

여기서 C_w 는 가장 안 좋은 목적 함수값, C_i 는 i 번째 해의 함수값, 그리고 C_b 는 가장 우수한 함수값이다.

Step 3. 적응(Adaptation)

strategy parameter 를 변화시킨다. strategy parameter 는 다음 단계인 변이 단계에서 변이의 정도를 제어하는 파라미터이다. 이 값은 앞에서 선택된 후보들의 그 전 세대 후보들과 비교해서 얼마나 개선되었는지를 기준으로 변화시키는 것이 일반적이다. 본 과제에서 구현된 strategy parameter 는 evolution window 이다. evolution window 는 변이 스텝에서 변이 집단 생성 범위를 제한한다. 만약 이번 세대의 적합도의 합이 이전 세대 적합도의 합보다 크다면, 즉 해가 더 우수한 해 집단이라고 판단된다면, evolution window 크기를 늘리고, 그렇지 않다고 판단된다면

evolution window 크기를 줄인다. window 크기는 미리 정해둔 상수를 곱하거나 나누어 주어 크기를 조절한다.

Step 4. 변이 (Mutation)

변이 단계에서는 step 2 에서 선택된 후보를 변이하여 새로운 해 집단을 만들고, 이를 자손해라고 정의한다. 변이 과정은 다음과 같다. 우선 변이 후보에서 하나를 랜덤하게 선정한다. 하지만 이 선정과정은 완전한 랜덤이 아니고, step 2 에서 계산된 적합도가 높을수록 선택될 확률이 높게 된다. 대표적인 방법으로 roulette wheel selection 을 들 수 있다. 이렇게 선정된 후보를 기준으로 step 3 에서 언급된 evolution window 내에서 랜덤한 값을 생성하게 된다. 이러한 과정을 총 λ 번 반복함으로써 총 λ 개의 새로운 해를 생성하고, 이들이 새로운 자손해가 된다.

Step 5. 재결합 (Recombination)

step 4 를 통하여 총 μ 개의 부모해와 λ 개의 자손해가 존재하게 된다. 재결합은 이 두 개의 해를 합하여 다음 세대 인구(population)을 이루는 과정이다. 이렇게 이루어진 인구는 다음 선택과정의 대상이 된다.

step 5 가 끝나면 다시 step 2 로 돌아가서 결과가 수렴할 때까지 반복하게 된다.

B.4 알고리즘 검증

본 연구를 위하여 ES 알고리즘을 이용한 최적화 프로그램이 작성되었으며, 그 검증을 위하여 테스트 함수에 적용하였다.

우선 간단한 구조를 가지는 다음과 같은 테스트 함수에 적용하여, 수렴 속도 테스트를 하였다.

$$F(x, y) = x^2 + y^2 - 2x + 4y + 2 \quad (\text{B.2})$$

이 함수는 그림 B.4 와 같은 형상을 가지며, 최적화는 최저점을 찾는 것으로 하였다. 최적화 수행 결과 그림 B.5 와 같이 정확한 최적점을 찾아냈다. 또한 그림 B.6 은 수렴과정을 나타내고 있다.

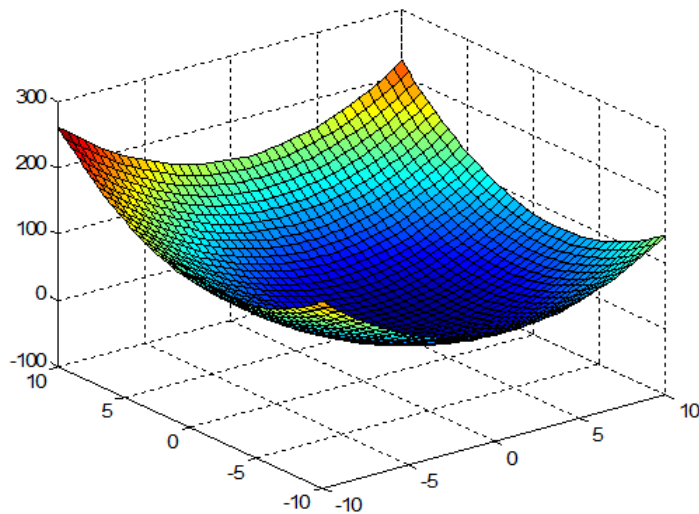


그림 B.4 테스트 함수 1

Fig. B.4 Test function 1

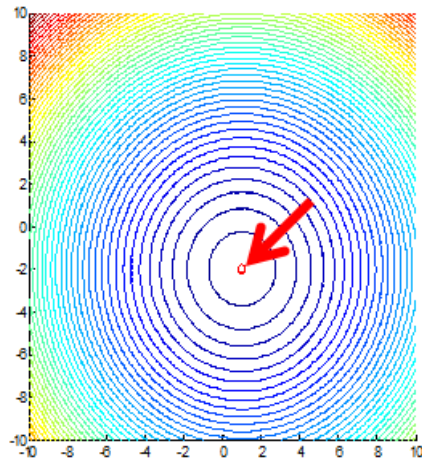


그림 B.5 테스트 함수 1 최적화 결과

Fig. B.5 Optimization result of test function 1

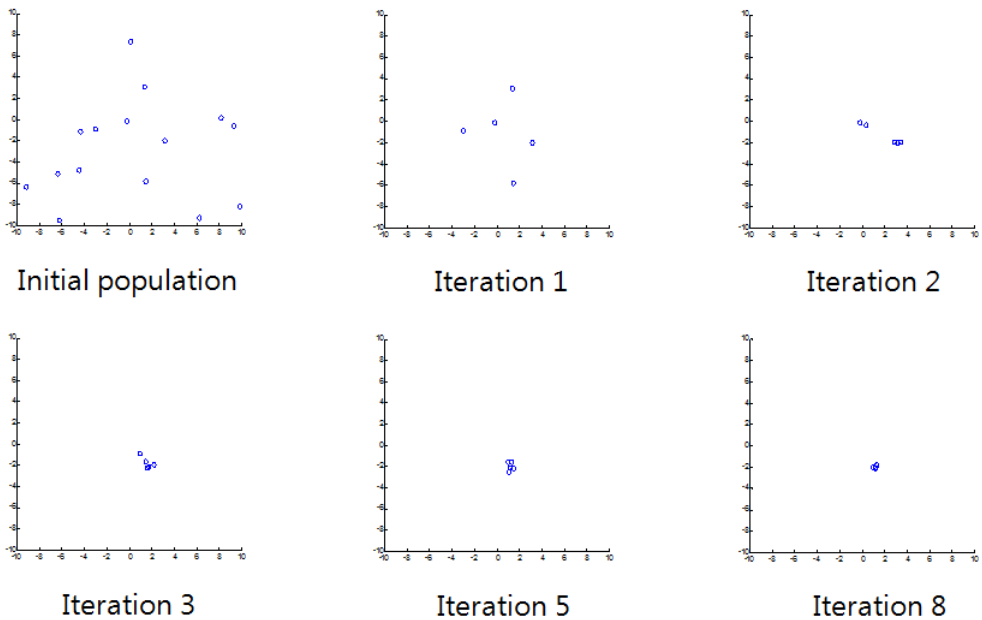


그림 B.6 테스트 함수 1 최적화 과정

Fig. B.6 Optimization process of test function 1

많은 국소 최적점을 가지는 테스트 함수의 경우에도 좀더 많은 iteration 과 큰 μ , λ 값을 통해 최적점을 찾아갈 수 있다. 아래 테스트 함수의 경우 그림 B.7 과 같이 좁은 범위 안에 많은 국소 최적점을 갖고 있다.

$$F(x, y) = 50 - (x - 5)^2 + 5 \cos(2\pi(x - 5)) + (y - 5)^2 + 5 \cos(2\pi(y - 5)) \quad (\text{B.3})$$

μ 를 5, λ 를 10 으로 정하고 최적화를 수행했을 때, 결과는 그림 B.8 과 같이 정확한 최적점을 찾았다.

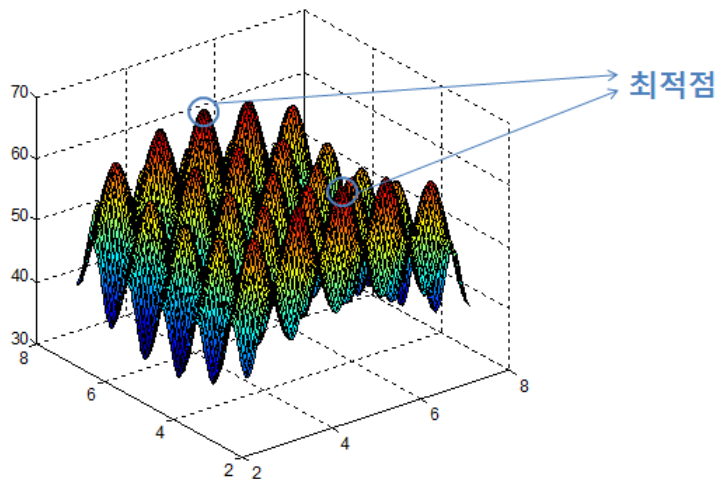


그림 B.7 테스트 함수 2

Fig. B.7 Test function 2

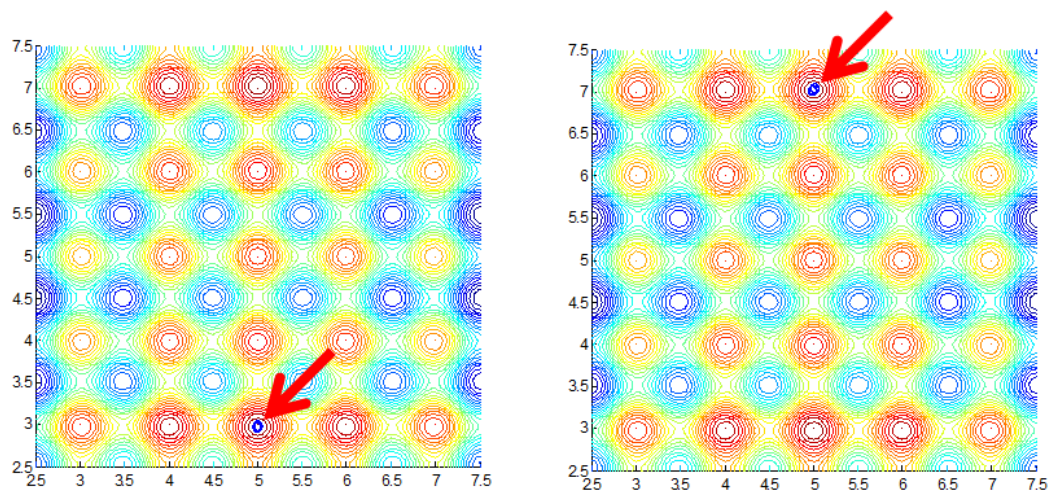


그림 B.8 테스트 함수 2 최적화 결과

Fig. B.8 Optimization result of test function 2

부록 C 2GJ급 토로이드형 SMES 최적설계

많은 연구 단체에서 SMES의 연구를 진행하며 SMES의 저장에너지는 계속해서 증가하고 있지만 현재까지는 MJ 단위의 SMES까지만 실제 제작 및 실험이 진행되었다. 하지만 GJ 단위의 대용량 SMES에 검토도 이미 이루어지고 있는데, 그 중 대표적인 것이 부하변동보상 및 주파수조정 용으로 일본에서 개발되고 있는 2GJ급 SMES이다. 이 연구에서는 YBCO 선재를 이용하여 토로이드형 SMES 코일을 설계하였으며, 이에 대한 실현 가능성에 대해 검토하고 있다.

본 장에서는 제안된 설계기법이 대용량 토로이드형 SMES 코일 설계에도 유효한지 알아보기 위해 2GJ급에 대한 설계를 진행하고, 그 결과를 위의 연구결과와 비교한다.

2GJ급 토로이드형 SMES의 설계에 사용된 YBCO 선재는 Ion Beam Assisted Deposition/Metal Organic Chemical Vapor Deposition YBCO (IBAD/MOCVD-YBCO)이다. 이 선재는 우수한 기계적 특성을 가지는 것으로 알려져 있어 선재에 높은 응력이 가해지는 대용량 SMES에 적합한 것으로 평가 받아 선택되었다. 이 선재의 수직자장에 대한 전류밀도 특성은 그림 C.1과 같다.

설계 목표 에너지 저장량은 2.4GJ이며, 동작온도는 20K이고, 선재의 폭과 두께는 각각 70mm, 0.82mm이다.

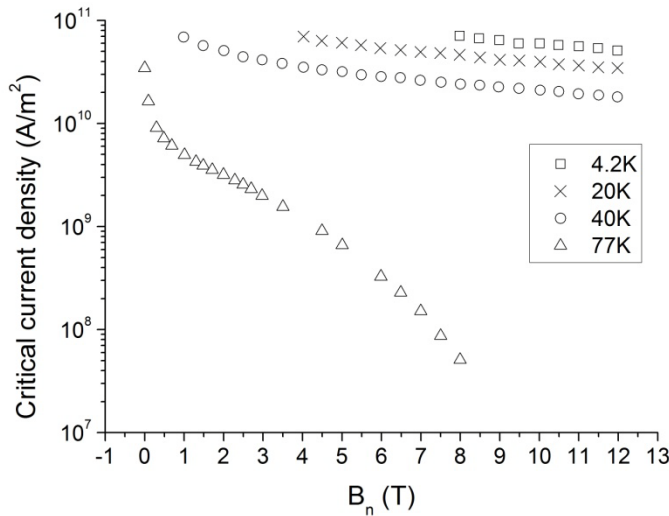


그림 C.1 YBCO 선재의 온도별 J_c - B 특성

Fig. C.1 The J_c - B characteristic of YBCO wire at different temperature

이러한 조건하에서 제안된 최적화 설계안을 통하여 최적설계를 진행하였으며, 그 결과는 표 C.1와 같다. 설계에는 약 7초 정도가 소요되었다. 제안된 설계기법을 통해 도출된 모델을 모델 1, 참고논문의 모델을 모델 2라고 하였을 때, 모델1은 모델 2보다 전체적인 크기가 좀더 크고, 모듈 수가 많지만, 사용 선재량은 오히려 더 적는데, 이는 모듈 당 턴 수가 더 적기 때문인 것으로 생각된다. 또한 모델 1은 최대 수직 자장이 더 작고, 동작전류가 모델 2보다 높다. 참고논문에서는 모듈 당 턴수, 초전도 층의 단면적 등을 명시하지 않았기 때문에 제시된 수치로부터 턴 수와 동작 전류밀도, load factor 등을 추산할 수 밖에 없었다. 또한 모델 2는 모듈 코

일의 운반성 등을 고려하여 설계에 제한을 두었다고 언급하였는데, 이러한 요소들로 인하여 모델 1과 모델 2가 차이를 보이는 것으로 생각된다. 하지만 전체적인 스케일 및 형상의 비율은 비슷하다는 것을 알 수 있고, 이로부터 제안된 설계기법의 유효성을 검증할 수 있었다.

표 C.1 YBCO 선재를 이용한 2GJ 토로이드형 SMES 코일의 최적 설계 결과

Table C.1 Optimization result of 2GJ toroidal SMES using YBCO CC

	제안된 설계기법을 통해 도출된 모델 (모델 1)	참고논문 모델 (모델 2)
토로이드의 외경 (m)	19.3	18.5
토로이드의 내경 (m)	14.9	13.9
모듈 수 (개)	186	180
모듈의 내경 (m)	1.7	1.5
모듈의 외경 (m)	2.2	2.3
전류 (A)	551	540
에너지 (GJ)	2.4	2.4
최대 자속밀도 (T)	11.4	11.0
최대 수직 자속밀도 (T)	0.64	0.67
총 선재 길이 (km)	1921	2090

Abstract

Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) is one of the Energy Storage Systems (ESS). It shows high efficiency, fast response time and large power compared to the other ESSs. Therefore, it is evaluated as a suitable candidate for improving power quality of power system. Especially after discovery of High Temperature Superconductor (HTS), the operation temperature and the energy density increased. Because of these reasons SMES is actively researched and developed by many research groups. However, HTS shows high anisotropy to perpendicular magnetic flux, which leads to increase of design difficulty. Unlike solenoidal SMES, toroidal SMES shows very good characteristics on stray field confinement and has small perpendicular flux density. Therefore the toroidal can use the HTS efficiently. However the configuration of toroidal SMES coil is more complicated than solenoidal SMES coil and it can be only analyzed by 3D numerical method. Because of these difficulties the required time for designing toroidal SMES increases exponentially.

In order to solve this problem, a new design methodology for toroidal SMES using HTS wire is proposed in this research. The design process is described in detail, including the important points

to be considered during design steps, and the solutions for the problems. First, the design variable are discussed and selected, then, the energy and the center flux density are calculated analytically. For the next step the maximum parallel and perpendicular flux density which is difficult to calculate in analytical method are required. To solve this problem a data table for the maximum parallel and perpendicular flux density is constructed. In order to construct a data table with reasonable size and use it for a wide spectrum of toroidal SMES design, the influence of variables to the parallel and perpendicular flux is observed. Through this observation, several ratios of design variables are selected as design parameters. With this design method the entire design steps of toroidal SMES can be performed without any numerical analysis.

Using the proposed design method, optimizations are performed on three kind of toroidal SMES coil with different energy and HTS. This result is compared to the optimization result obtained using finite element analysis. The model designed by proposed method is very close to the one that is designed by finite element analysis, while dramatically reducing the required time for optimization.

Key Words: Toroidal Superconducting Magnetic energy Storage (SMES), Energy Storage System (ESS), High Temperature Superconductor (HTS), Design method, Optimal design

Student Number: 2007–21035